University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 13, No. 1, Spring 2023 (77-97)
doi: 10.22124/CR.2023.25514.1786
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Optimizing proso millet production according to planting date and growth analysis

Fatemeh Ghorbannezhad[1], Mohsen Zavareh[2*] and Mohammad Rahmani[3]

1. Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran (* Corresponding author: mzavareh@guilan.ac.ir)
3. Researcher, Seed and Plant Certification and Registration Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

The increasing demand for diverse fodder plants, along with the challenges of its production such as the pressure on pastures, has led to increased attention to strategies for maximizing the production of these plants per unit area. Millets are a good choice for crop rotation and production patterns in different regions due to their high diversity, high adaptability, high dry matter production, and high nutritional value. However, the appropriate planting date and the compatibility of the growth stages of millet with environmental conditions are essential for maximizing production. This study was conducted to evaluate the effect of different planting dates on the growth indices of proso millet and how its growth stages are compatible with environmental conditions.

Materials and methods

To achieve the objectives of the research, a two-year field experiment was conducted in 2016-2017 and 2017-2018 at the research farm of the Faculty of Agricultural Sciences of the University of Guilan. A randomized complete block design with four replications and four planting dates was used (May 29, June 27, July 29, and August 29 in the first year; and June 4, July 7, August 5, and September 6 in the second year). Plant growth indices, plant response, and the compatibility of plant growth stages with environmental conditions were investigated through repeated sampling, measurement of plant leaf area and dry matter of different plant parts, and recording of phenological stages.

Research findings

The results of this experiment showed that the planting date influenced the dry matter accumulation, by changing in plant growth indices such as leaf area index (LAI), crop growth rate (CGR), relative growth rate (RGR), net absorption rate (NAR), leaf area ratio (LAR), and leaf weight ratio (LWR). In the first cropping year, the highest total dry matter accumulation of proso millet, with an average of 1030.8 grams per square meter, was obtained by planting it on June 27. This was due to the maximum LAI (5.14) and crop growth rate (35.5 $g \cdot m^{2} \cdot day^{-1}$) obtained in the second planting time, which led to a significant increase in dry matter compared to the other three planting dates. However, in the second year of the experiment, planting proso millet on June 4 resulted in a significant increase in LAI (3.69), CGR (25.99 $g \cdot m^{2} \cdot day^{-1}$), and NAR (18.13 g per square meter of leaf area per day) compared to the other three planting dates. As a result of the aforementioned growth indices, the total dry matter accumulation of proso millet was 734.66 grams per square meter, which showed a significant increase compared to the other three planting dates.

CC BY

Conclusion

Overall, the results of this experiment suggest that the optimal planting date for proso millet in Rasht is between June 4 and June 27. Planting during this period resulted in the highest accumulation of dry matter and the most favorable growth indices. The findings of this study can be used to improve the cultivation practices of proso millet in Rasht and other similar regions.

Keywords: Dry matter, Growth and development, Leaf area, Planting date

Received: September 8, 2023 Accepted: October 24, 2023

Cite this article:

Ghorbannezhad, F., Zavareh, M. and Rahmani, M. 2023. Optimizing proso millet production according to planting date and growth analysis. *Cereal Research*, 13(1), pp. 77-97.

تحقیقات غلات
دوره سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲ (۹۷-۷۷)
doi: 10.22124/CR.2023.25514.1786
مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

بهینه‌سازی تولید ارزن پروسو با توجه به تاریخ کاشت و تجزیه و تحلیل رشد

فاطمه قربان‌نژاد[۱]، محسن زواره[۲] و محمد رحمانی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران (* نویسنده مسئول: mzavareh@guilan.ac.ir)
۳- پژوهشگر، موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده جامع

مقدمه: نیاز روزافزون به علوفه در کنار چالش‌های تولید آن مانند فشار بر مراتع، توجه به راهکارهای افزایش تولید در واحد سطح انواع گیاهان علوفه‌ای را افزایش می‌دهد. در میان گیاهان علوفه‌ای، ارزن‌ها به‌دلیل تنوع زیاد، سازگاری بالا، تولید بالای ماده خشک و نیز ارزش غذایی فراوان می‌تواند به‌عنوان انتخابی مناسب در تناوب زراعی و الگوهای تولید مناطق مختلف قرار گیرند. این کار نیازمند آگاهی از تاریخ مناسب کشت این گیاه و آشنایی با چگونگی انطباق مراحل مختلف رشدی آن با شرایط آب و هوایی منطقه کشت است تا کشت و کار آن منجر به افزایش تولید شود. این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر تاریخ‌های مختلف کاشت بر شاخص‌های رشدی ارزن پروسو و چگونگی هم‌نوایی مراحل رشد آن با شرایط محیطی، طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها: برای رسیدن به اهداف پژوهش، آزمایشی در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار و چهار تاریخ کاشت (در سال اول ۸ خرداد، ۶ تیر، ۷ مرداد و ۷ شهریور و در سال دوم ۱۴ خرداد، ۱۶ تیر، ۱۴ مرداد و ۱۵ شهریور) انجام شد. با نمونه‌برداری‌های متناوب و اندازه‌گیری سطح برگ و ماده خشک اجزای مختلف بوته در کنار ثبت مراحل فنولوژیک، شاخص‌های رشدی و پاسخ عملکرد ماده خشک گیاه و انطباق مراحل نموی گیاه با شرایط محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌های تحقیق: یافته‌های این آزمایش نشان داد که تاریخ کاشت با تغییر شاخص‌های رشدی مورد مطالعه مانند شاخص سطح برگ (LAI)، سرعت رشد گیاه زراعی (CGR)، سرعت رشد نسبی (RGR)، سرعت جذب خالص (NAR)، نسبت سطح برگ (LAR) و نسبت وزن برگ (LWR) بر انباشت ماده خشک تأثیرگذار بوده است. در این پژوهش در نخستین سال زراعی، بیش‌ترین انباشت ماده خشک کل ارزن پروسو با میانگین ۱۰۳۰٫۸ گرم بر متر مربع با کاشت آن در تاریخ ششم تیرماه حاصل شد. افزایش ماده خشک ارزن پروسو در دومین زمان کاشت به نقش مؤثر شاخص سطح برگ به‌عنوان مهم‌ترین منبع تولید ماده پرورده و سرعت رشد گیاه زراعی ارتباط داشت. به‌عبارت دیگر، بیشینه شاخص سطح برگ (۵٫۱۴) و سرعت رشد گیاه (۳۵٫۵ گرم بر گرم در متر مربع) در ارزن پروسو در دومین زمان کاشت به‌دست آمد که این امر توانست ماده خشک آن را در مقایسه با سه تاریخ کاشت دیگر افزایش دهد. با این‌حال، در دومین سال آزمایش، با کاشت ارزن پروسو در نخستین زمان کاشت (۱۴ خرداد)، شاخص سطح برگ (۳٫۶۹)، سرعت رشد گیاه (۲۵٫۹۹ گرم بر گرم در متر مربع) و سرعت جذب خالص (۱۸٫۱۳ گرم بر متر مربع سطح برگ در روز) به‌صورت قابل توجهی در مقایسه با سه تاریخ کاشت دیگر افزایش یافت. پیامد

افزایش شاخص‌های رشدی اشاره شده، افزایش انباشت ماده خشک کل ارزن پروسو به‌میزان ۷۳۴٫۶۶ گرم بر متر مربع بود که افزایش معنی‌داری در مقایسه با سه تاریخ کاشت دیگر نشان داد.

نتیجه‌گیری: در کل با توجه به یافته‌های این آزمایش می‌توان انتظار داشت که با کشت ارزن پروسو در بازه زمانی ۱۴ خردادماه تا ششم تیرماه در رشت بتوان زیست‌توده بیش‌تری در مقایسه با تاریخ‌های کاشت دیگر تولید کرد.

واژه‌های کلیدی: رشد و نمو، سطح برگ، شاخص‌های رشد، ماده خشک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

نحوه استناد به این مقاله:

قربان‌نژاد، فاطمه، زواره، محسن و رحمانی، محمد. ۱۴۰۲. بهینه‌سازی تولید ارزن پروسو با توجه به تاریخ کاشت و تجزیه و تحلیل رشد. *تحقیقات غلات*، ۱۳(۱): ۹۷-۷۷.

مقدمه

در سال‌های اخیر، تقاضای جهانی برای فرآورده‌های دامی، رشد بی‌سابقه‌ای داشته است و این رشد ادامه‌دار خواهد شد. یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهند که تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به یک میلیارد هکتار از اکوسیستم‌های طبیعی به‌دلیل رشد فزاینده جمعیت و نیاز روز افزون به فرآورده‌های دامی به اکوسیستم‌های کشاورزی تبدیل می‌شوند که می‌تواند سلامت محیط زیست و تنوع زیستی را به‌خطر اندازد (Heggenstaller *et al*., 2009; Zhang *et al*., 2019a). فراهم کردن این نیاز رو به رشد در گرو رو به رو شدن با چالش‌های زیادی در تامین علوفه و نهاده‌هایی مانند آب و زمین برای کشت و کار آن‌ها است. بنابراین، راه حل‌های مبتنی بر افزایش بازده در واحد سطح می‌تواند در کنار تولید علوفه مورد نیاز، فشار افزایش سطح زیر کشت را کاهش دهد. افزایش بازده در واحد سطح با وجود کمبود منابع آب و رخداد پدیده تغییر اقلیم (Kouchaki and Nasiri, 2008)، نیازمند بهینه‌سازی مدیریت کشت گیاهان علوفه‌ای، از جمله توجه به گیاهان علوفه‌ای زودرس، با نیاز آبی کم‌تر و متحمل به تنش‌های محیطی مانند ارزن‌ها و وارد کردن آن به سیستم‌های زراعی و الگوهای کشت است (Ullah *et al*., 2017).

در جهان بیش از ۲۰۰ جنس و گونه گیاهی کشت می‌شود که از آنها به‌عنوان ارزن نام برده شده است و از معروف‌ترین آنها می‌توان به ارزن مرواریدی *Cenchrus americanus* (L.) Morrone که با نام *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. هم شناخته شده، ارزن دم‌روباهی [*Setaria italica* (L.) P. Beauvois]، ارزن پروسو (*Panicum miliaceum* L.) و ارزن انگشتی (*Eleusine coracana* (L.) Gaerth) اشاره کرد (Wen *et al*., 2014). ارزن پروسو گیاهی یک‌ساله، روزکوتاه، دیپلوئید (2n=36) و خودگشن است که با داشتن نیاز آبی کم و سازگاری مناسب به شرایط آب و هوایی و خاکی گوناگون، قابلیت خوبی برای کشت در نواحی مختلف دارد (Turgut *et al*., 2006). چرخه زندگی این گیاه بین ۶۰ تا ۹۰ روز متغیر است و از این‌رو می‌تواند به‌عنوان یک گیاه اصلی تابستانه و یا به‌عنوان گیاه دوم به‌همراه غلات زمستانه کشت شود (Ventura *et al*., 2020).

عملکرد و فرایندهای مرتبط با آن، به ژنتیک، محیط، عوامل مدیریتی و برهم‌کنش بین آن‌ها وابسته است. از جمله عوامل مدیریتی که تاثیر زیادی بر عملکرد و تولید زیست‌توده دارد، انتخاب زمان کاشت مناسب است (Ferrise *et al*., 2010)، زیرا کشت در تاریخ‌های مختلف سبب می‌شود که شرایط محیطی متفاوتی از نظر دما، تابش، رطوبت و طول دوره روشنایی در چرخه رشد گیاه ایجاد شود (Srivastava *et al*., 2016)، که با تغییر سرعت رشد و نیز طول مراحل زیست‌گردی می‌تواند بر بازده گیاه و مولفه‌های مرتبط با آن تاثیر بگذارد (Kalra *et al*., 2008).

ارزن پروسو گیاهی گرمادوست است که برای تولید بالا باید در تاریخ‌های بهینه کشت شود. انتظار می‌رود که با تاخیر در کاشت، ظرفیت منابع فتوسنتزی محدود شود که کاهش دریافت نور و انتقال مواد پرورده به اندام‌های دریافت کننده را به‌دنبال خواهد داشت (Bonelli *et al*., 2016). یافته‌های لو و همکاران (Lu *et al*., 2017) موید این دیدگاه است. توییدول و کیفر (Twidwell *et al*., 1992) گزارش دادند که تاخیر در کاشت از ژوئن (خرداد ماه) به جولای (تیر) می‌تواند ماده خشک ارزن دم روباهی را ۴۵ درصد کاهش دهد. آن‌ها این کاهش ماده خشک را به بارش‌های نامناسب در اوایل فصل رشد نسبت دادند. از طرفی، درا و ماتیواواریا (Dera and Mativavarira, 2018) وجود دمای پایین در طول فصل رشد را به‌عنوان عامل مهمی در کاهش عملکرد ماده خشک در کشت‌های تاخیری به‌شمار آوردند. گویه و همکاران (Gueye *et al*., 2015) نیز مشاهده کردند که با تاخیر در کاشت ارزن فونیو از زمان بهینه، عملکرد زیست‌توده به‌شدت کاهش می‌یابد. آن‌ها این کاهش عملکرد را به بارندگی‌های بسیار زیاد، کوتاه شدن طول روز و کمبود آب طی مرحله زایشی به‌ویژه دوره پرشدن دانه نسبت دادند. ژانگ و همکاران (Zhang *et al*., 2019b) با انجام پژوهشی دریافتند که با تاخیر در کاشت ارزن دم‌روباهی، تولید ماده خشک آن به‌دلیل کاهش دریافت تابش خورشیدی طی فصل رشد کاهش می‌یابد. ردی و ویسر (Reddy and Visser, 1993) بیان کردند که ژنوتیپ‌های مختلف ارزن مرواریدی حساسیت بالایی به فتوپریود دارند و به‌همین علت، تاخیر در کاشت با کاهش طول دوره رویشی تاثیر منفی بر تولید زیست‌توده آن دارد. در ارزن مرواریدی مشاهده شده است که افزایش هر درجه سلسیوس دما در مرحله زایشی می‌تواند طول دوره آن را حدود دو روز کاهش دهد که به‌دنبال آن عملکرد گیاه نیز کاهش می‌یابد (Prasad *et al*., 2020).

مدارکی در دست است که نشان می‌دهد کشت زود هنگام نیز تاثیر منفی بر عملکرد دانه و زیست‌توده دارد (Bruns and Abbas, 2006; Van Roekel and Coulter, 2011)، که برای نمونه می‌توان به یافته‌های ساندرز و یوهانسون (Saunders and Johnson, 1998) در ذرت و کاسترو و همکاران (Castro *et al*., 2000) در سورگوم اشاره کرد. با این‌حال، گزارش‌هایی نیز وجود دارد که نشان می‌دهد در کشت‌های زودهنگام، طول فصل رشد گیاه افزایش می‌یابد (Jan *et al*., 2015) و در نتیجه روز-درجه مورد نیاز برای رسیدن به مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در زمان طولانی‌تری تامین خواهد شد (Maurya *et al*., 2015). بنابراین، فرصت بیش‌تری در اختیار گیاه وجود دارد که زیست‌توده بیش‌تری تولید کند (Dera and Mativavarira, 2018). برای نمونه، افزایش ماده خشک با کشت زودهنگام در ارزن پروسو (Anderson, 1994) و سورگوم (Wiedenfeld and Matocha, 2010) مشاهده شده است.

برای توصیف و بیان واکنش گیاهان به شرایط محیطی دوره رشد آن‌ها می‌توان از تجزیه و تحلیل کمی رشد استفاده کرد (Russelle *et al*., 1984). این روش نخستین بار توسط بلکمن (Blackman, 1919) پیشنهاد و استفاده شد. از منظر تجزیه و تحلیل رشد، تولید ماده خشک یک گیاه از برهم‌کنش مولفه‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک به‌دست می‌آید که نمایانگر ظرفیت آن برای دستیابی به منابع محدود کننده رشد و کارایی استفاده از آن منابع است (Heggenstaller *et al*., 2009). ظرفیت تولید ماده خشک یک گیاه به اندازه سیستم فتوسنتزی، فعالیت آن و نیز طول دوره رشد آن وابسته است (Watson, 1947). در این میان، نقش سطح برگ به‌عنوان اندام اصلی فتوسنتز کننده در دریافت نور و تبدیل آن به زیست‌توده بسیار حائز اهمیت است (Zhang *et al*., 2015; Xie *et al*., 2017).

واتسون (Watson, 1958) برای تعیین نقش سطح برگ در رشد و نمو یک گیاه، مفهوم شاخص سطح برگ (LAI) را به‌صورت نسبت سطح برگ سبز به سطح زمین زیر آن معرفی کرد. این شاخص اندازه دستگاه فتوسنتزی را برای دریافت تابش خورشیدی نشان می‌دهد (Virk *et al*., 2020). در این راستا، ظرفیت یک گیاه برای دریافت تابش فعال فتوسنتزی و سنتز کربوهیدرات به‌صورت یک تابع غیرخطی از LAI است (Elings, 2000). به این معنی که، این شاخص با افزایش سن گیاه تا حد خاصی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد (Gardner *et al*., 2017). گزارش‌هایی مبنی بر تاثیرپذیری شاخص سطح برگ از زمان‌های مختلف کاشت در دست است. به‌عنوان نمونه، ویلیامز و لیندکویست (Williams and Lindquist, 2007) دریافتند که تاخیر در کاشت از ششم ماه می (۱۶ اردیبهشت) به ۲۱ ژوئن (۳۱ خرداد) می‌تواند شاخص سطح برگ ذرت را بین ۲۷ تا۴۴ درصد کاهش دهد. این موضوع در یافته‌های محمد و همکاران (Muhammad *et al*., 2019) و مشاور و همکاران (Moshaver *et al*., 2016) روی گیاه ذرت نیز به‌دست آمده است. در مقابل، گزارشی هم وجود دارد که به افزایش شاخص سطح برگ سورگوم در کشت دیرهنگام در نتیجه سبزمانی بیش‌تر برگ‌ها در کشت‌های تاخیری اشاره دارد (Wiedenfeld and Matocha, 2010). با این‌حال، تاثیر مثبت شاخص سطح برگ بر تولید ماده خشک به نحوه تاثیرپذیری سرعت جذب خالص (NAR) از آن وابسته است، زیرا سرعت جذب خالص، معیاری از کارایی فتوسنتزی برگ‌ها در یک جامعه گیاهی به‌شمار می‌آید و در صورتی که افزایش سطح برگ منجر به سایه‌اندازی متقابل برگ‌ها روی هم شود، مقدار آن نیز کاهش می‌یابد (Watson, 1958). گزارش‌هایی هم وجود دارند که به تاثیرپذیری NAR از زمان‌های کاشت دلالت دارد که برای نمونه می‌توان به یافته‌های عباس و همکاران (Abbas *et al*., 2019) اشاره کرد.

سرعت رشد نسبی یا RGR (Briggs *et al*., 1920) یکی دیگر از شاخص‌های رشد پر کاربرد است که در طول فصل رشد و با افزایش سن گیاه و افزایش بافت‌های ساختاری غیرفعال در سوخت‌وساز کاهش می‌یابد (Evans, 1972). کریمی و صدیق (Karimi and Siddique, 1991) کاهش سرعت رشد نسبی در طول فصل رشد را به سایه‌اندازی متقابل برگ‌ها نسبت دادند و دریافتند که افزایش تعداد برگ‌های پیر می‌تواند مقدار RGR را در انتهای فصل رشد به حد منفی کاهش دهد. در مقابل، سرعت رشد گیاه زراعی یا CGR (Watson, 1947) که سرعت تولید در واحد سطح زمین و به بیان دیگر برهم‌کنش تنفس و فتوسنتز را نشان می‌دهد (Pearce *et al*., 1985)، به بهترین شکل، مفهوم رشد را می‌رساند. این شاخص از حاصل‌ضرب LAI در NAR نیز به‌دست می‌آید. بر این اساس، بیش‌ترین CGR هنگامی به‌دست

می‌آید که پوشش برگ‌ها کامل باشد. این حالت نشان دهنده حداکثر توانایی تولید ماده خشک و حداکثر میزان تبدیل انرژی خورشیدی در گیاه است (Evans, 1972). آدو-کوآی و همکاران (Addo-Quaye *et al*., 2011) به نقش موثر شاخص سطح برگ بر سرعت رشد گیاه زراعی اشاره کردند و دریافتند که بیش‌ترین مقدار سرعت رشد گیاه زراعی در اواسط دوره رشد گیاه به‌دست می‌آید. ویلسون (Wilson, 1981) معتقد است که با استفاده از دو شاخص RGR و CGR که از زمان کاشت گیاهان متأثر می‌شوند (Patterson, 1993; Loveys *et al*., 2002)، می‌توان رشد گیاه را بهتر بررسی کرد. در این راستا، بونلی و همکاران (Bonelli *et al*., 2016) گزارش کردند که اثر منفی کشت‌های تاخیری بر CGR موجب کاهش انباشت ماده خشک ذرت می‌شود. تاثیر زمان کاشت بر CGR در یافته‌های تحقیقات دهمرده و دهمرده (Dahmardeh and Dahmardeh, 2010) و کریم‌زاده سورشجانی و همکاران (Karimzadeh Soureshjani *et al*., 2019) نیز گزارش شده است.

با توجه به اهمیت تولید علوفه در گیلان و نبود اطلاعات مدون از تاریخ کشت ارزن‌ها در این منطقه و با توجه به این‌که تعیین تاریخ کاشت مناسب اولین گام برای اجرای پژوهش‌های مرتبط با یک گیاه می‌باشد و از عوامل مهمی است که ویژگی‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک یک گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهد، این پژوهش با هدف بررسی اثر تاریخ‌های مختلف کاشت بر شاخص‌های رشد ارزن پروسو در رشت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار و چهار تاریخ کاشت (در سال اول ۸ خرداد، ۶ تیر، ۷ مرداد، ۷ شهریور و در سال دوم ۱۴ خرداد، ۱۶ تیر، ۱۴ مرداد و ۱۵ شهریور) طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان اجرا شد. عملیات خاک‌ورزی شامل شخم عمیق در اوایل بهار با گاوآهن برگردان‌دار انجام شد. پس از آن، برای تسطیح و خرد کردن کلوخه‌ها از دو دیسک عمود بر هم و لولر استفاده شد. پیش از اجرای آزمایش و به‌منظور تعیین ویژگی‌های خاک مزرعه آزمایشی، نمونه مرکبی از خاک تهیه و ویژگی‌های آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱). سپس بر اساس نتایج به‌دست آمده و به‌منظور تامین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم پیش از کاشت اعمال شد. در ادامه، زمین آزمایش، بلوک‌بندی و کرت‌بندی شد. ابعاد کرت‌ها ۳×۳,۵ متر (۱۰,۵ متر مربع) در نظر گرفته شد و در هر کرت، هفت ردیف سه متری با فاصله ۵۰ سانتی‌متر بین ردیف‌ها کشت شد. بذر ارزن پروسو از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شد. بذرها به‌صورت متراکم و درون شیارهایی به‌عمق سه سانتی‌متر به‌صورت دستی کشت شد. هم‌زمان با کاشت، مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌صورت نواری استفاده شد. پس از استقرار گیاهچه‌ها و در مرحله ۴-۳ برگی، عملیات تنک انجام و فاصله بوته‌های روی ردیف‌ها در حدود ده سانتی‌متر تنظیم شد. هم‌زمان با تنک، مبارزه با علف‌های هرز و سله شکنی نیز انجام شد. آبیاری به‌صورت قطره‌ای و با استفاده از نوارهای آبیاری انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی به‌فاصله هر هفت روز یک‌بار انجام شد.

برای ارزیابی شاخص‌های رشد ارزن، نمونه‌برداری به روش تخریبی از مرحله پنجه‌زنی تا برداشت نهایی با فاصله هر ۷ و ۱۰ روز یک‌بار به‌ترتیب در سال اول و دوم انجام شد. نمونه‌ها پس از برداشت بی‌درنگ به آزمایشگاه منتقل و برگ، ساقه و سایر اجزای آن‌ها جدا شدند. سپس، مساحت برگ‌ها با استفاده از دستگاه پرتابل اندازه‌گیری سطح برگ (مدل LI3000C، ساخت آمریکا)، اندازه‌گیری شد. برای به‌دست آوردن وزن خشک، نمونه‌های تفکیک شده شامل برگ، ساقه و خوشه، به‌مدت ۴۸ ساعت در آون تهویه‌دار در دمای ۷۲ درجه سلسیوس خشک و سپس با ترازوی حساس با دقت ۰,۰۰۱ گرم (مدل G.C.L. BUBBLE ETCH TANKS، ساخت انگلستان) وزن شدند. بر اساس داده‌های مساحت برگ و وزن خشک، سایر شاخص‌ها مانند شاخص سطح برگ ($\overline{LAI}$) (Watson, 1958)، سرعت رشد گیاه زراعی ($\overline{CGR}$) (Watson, 1947)، سرعت جذب خالص ($\overline{NAR}$) (Watson, 1947)، سرعت رشد نسبی ($\overline{RGR}$) (Briggs *et al*., 1920)، نسبت وزن برگ ($\overline{LWR}$) (Koller, 1972) و نسبت سطح برگ ($\overline{LAR}$) (Poorter and Remkes, 1990) با روابط (۱) تا (۶) محاسبه شدند:

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مزرعه آزمایشی در دو سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷

Table 1. Soil properties of the experimental field in 2017-2018 and 2018-2019 cropping years

Year	Depth (cm)	Soil texture	EC † ($dS.m^{-1}$)	pH	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	CEC † ($meq.100g^{-1}$)	OC † (%)
2017-2018	0-30	Silty clay	0.51	6.05	0.14	4.35	58.45	24.69	1.75
	30-60	Silty clay	0.54	5.11	0.13	1.5	73.35	28.19	1.4
2018-2019	0-30	Silty clay	0.46	6.8	0.10	4.4	110	33.5	0.82
	30-60	Silty clay	0.59	6.8	0.04	0.8	120	31.5	0.44

† EC, electrical conductivity; CEC, cation exchange capacity; OC, organic carbon.

$$\overline{LAI} = \frac{LA1+LA2}{2} \times \frac{1}{P} \quad (۱)$$

$$\overline{CGR} = \frac{W2-W1}{t2-t1} \times \frac{1}{p} \quad (۲)$$

$$\overline{NAR} = \frac{LnLA2-LnLA1}{LA2-LA1} \times \frac{W2-W1}{t2-t1} \quad (۳)$$

$$\overline{RGR} = \frac{Lnw2-Lnw1}{t2-t1} \quad (۴)$$

$$\overline{LWR} = \frac{LW1}{W1} + \frac{LW2}{W2} \quad (۵)$$

$$\overline{LAR} = (\frac{LA1}{W1} + \frac{LA2}{W2})/2 \quad (۶)$$

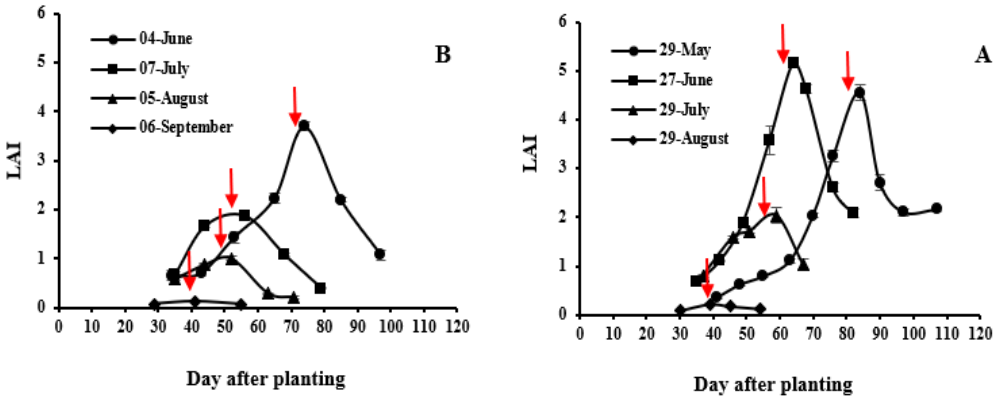
در این روابط، w وزن خشک کل گیاه بر حسب گرم، w_1 و w_2 به‌ترتیب وزن خشک اولیه و ثانویه)، t زمان نمونه‌برداری برحسب روز (t_1 و t_2 به‌ترتیب زمان نمونه‌برداری اول و دوم)، p سطح زمین زیر گیاهان برداشت شده بر حسب متر مربع و LA سطح برگ‌های گیاه بر حسب متر مربع (LA_1 و LA_2 به‌ترتیب سطح برگ در نمونه‌برداری اول و دوم) و Ln لگاریتم طبیعی است.

پس از اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه و محاسبه شاخص‌های رشد، داده‌های به‌دست آمده از آزمایش ثبت و به‌منظور مقایسه تیمارها و روند تغییرات شاخص‌ها در آنها، نمودارهای مربوطه با استفاده از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۹ رسم شد.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ ($\overline{LAI}$)

شاخص سطح برگ نقش مهمی در تولید ماده خشک یک گیاه دارد (Jia *et al*., 2019) و مقدار آن به نوع گیاه، تراکم کشت، شرایط نوری و ساختار سایه‌انداز وابسته است (Nurmuliana and Akib, 2019). یافته‌های این آزمایش نشان داد که در هر دو سال زراعی و در هر چهار تاریخ مورد بررسی، توسعه سطح برگ‌ها در ابتدای فصل رشد به‌کندی انجام شد، اما پس از استقرار کامل گیاه، شیب افزایش سطح برگ نیز بیش‌تر شد و تا زمان رسیدن به بیشینه شاخص سطح برگ، ادامه یافت و سپس با گذشت زمان از مقدار آن کاسته شد (شکل ۱-A و B).

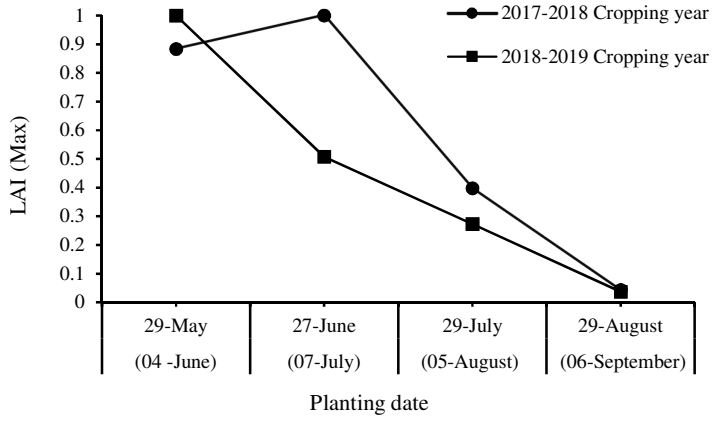


شکل ۱- تغییرات شاخص سطح برگ ارزن پروسو در تاریخ‌های مختلف کشت در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ (A) و ۹۸-۱۳۹۷ (B). میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 1. Changes in leaf area index (LAI) of proso millet in different planting dates in two cropping years, 2017-18 (A), and 2018-19 (B). Vertical bars shows standard error.

نتایج به‌دست آمده از این آزمایش، تفاوت‌های معنی‌دار و کاملاً مشخصی را از نظر مقدار و زمان دستیابی به بیشینه شاخص سطح برگ در هر دو سال زراعی مورد مطالعه نشان داد (شکل ۱-A و B). در نخستین سال آزمایش (۹۷-۱۳۹۶) و در تاریخ کاشت اول (هشتم خرداد)، شاخص سطح برگ ارزن پروسو ۸۴ روز پس از کاشت به بیشینه مقدار خود (۴,۵۴) رسید (شکل ۱-A). از طرف دیگر، تاخیر در کاشت از هشتم خردادماه به ششم تیرماه موجب افزایش معنی‌دار شاخص سطح برگ (۱۱,۶۷ درصد) شد (شکل ۲) و مقدار آن در ۶۴ روز پس از کاشت به ۵,۱۴ رسید (شکل ۱-A). علت کاهش شاخص سطح برگ ارزن پروسو در نخستین زمان کاشت می‌تواند مرتبط با تاثیر دما بر سرعت پیدایش برگ‌ها و نیز اثر مهم سرعت ظهور برگ بر مقدار سطح برگ باشد (Craufurd *et al*., 1997; Sinclair *et al*., 2004)، به این معنی که احتمالاً دمای پایین‌تر در کشت اول موجب شد تا فاصله زمانی میان ظهور برگ‌ها افزایش یابد (Parthasarathi *et al*., 2013) و این موضوع کاهش شاخص سطح برگ ارزن پروسو را به‌دنبال داشت (Jia *et al*., 2019).

با این‌حال، واکنش ارزن پروسو نسبت به تاخیر در کاشت از ششم تیر به هفتم مرداد و هفتم شهریور منفی بود و مقدار شاخص سطح برگ آن به صورت معنی‌داری کاهش یافت. به بیان دیگر، در سومین زمان کاشت (هفتم مرداد)، بیشینه شاخص سطح برگ ارزن پروسو ۲,۰۴ به‌دست آمد (۵۹ روز پس از کاشت) که نسبت به بیشینه مقدار خود کاهش ۶۰,۳۱ درصدی نشان داد (شکل ۲). این واکنش منفی در چهارمین زمان کاشت با شدت بیش‌تری مشاهده شد، به‌گونه‌ای که بیشینه شاخص سطح برگ ارزن پروسو (۰,۲۲) ۳۹ روز پس از کاشت به‌دست آمد (شکل ۱-A) که در مقایسه با بیش‌ترین مقدار آن، کاهش ۹۵,۷۱ درصدی نشان داد (شکل ۲). در مقابل در دومین سال و در نخستین زمان کاشت (۱۴ خرداد)، بیشینه شاخص سطح برگ ارزن پروسو ۳,۶۹ (۷۴ روز پس از کاشت) بود که در مقایسه با سه تاریخ کاشت دیگر افزایش چشم‌گیری نشان داد. به‌عبارت دیگر، با تغییر تاریخ کاشت از ۱۴ خرداد به ۱۶ تیر، ۱۴ مرداد و ۱۵ شهریور، بیشینه شاخص سطح برگ ارزن پروسو به‌ترتیب ۱,۸۷ (۷۴ روز پس از کاشت)، ۱ (۶۸ روز پس از کاشت) و ۰,۱۳ (۴۱ روز پس از کاشت) بود که در مقایسه با نخستین زمان کاشت به‌ترتیب ۴۹,۳۲، ۷۲,۸۹ و ۹۶,۴۷ درصد کاهش یافت (شکل ۲). از آنجا که ارزن یک گیاه روز کوتاه است (Baltensperger, 2002)، بنابراین روزهای بلند (دوره نوری ۱۶-۱۴ ساعت) زمان تشکیل جوانه گل را در این گیاه به تاخیر می‌اندازد و طول روز کوتاه (دوره نوری کم‌تر از ۱۲ ساعت) گل‌دهی آن را تسریع می‌کند (Maas *et al*., 2007). این موضوع می‌تواند بر طول دوره رویشی و زایشی ارزن موثر باشد.



شکل ۲- نسبت بیشینه شاخص سطح برگ ارزن پروسو طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷. ماه‌های ذکر شده در داخل پرانتز مربوط به دومین سال آزمایش است.

Figure 2. Maximum ratio of leaf area index of proso millet in two consecutive crop years, 2017-18 and 2018-19. The months represented in parentheses are related to the second year of the experiment.

در کشت‌های زودهنگام به‌دلیل بلند بودن طول روز در بخش بزرگی از دوره رشد ارزن، دوره رویشی آن نیز طولانی‌تری شد و در نتیجه صفات مرتبط با رشد رویشی همانند شاخص سطح برگ نیز در نخستین زمان کاشت (۱۴ خرداد) افزایش بیش‌تری نشان داد. اما با تاخیر در کاشت، قبل از توسعه کامل سطح برگ، ورود گیاه به مرحله زایشی تسریع شد و به‌دنبال آن شاخص سطح برگ کاهش یافت. در کنار دوره نوری، شرایط محیطی مناسب‌تری به لحاظ دما در نخستین زمان کاشت حاکم بود که این موضوع رشد بیش‌تر برگ‌ها و افزایش شاخص سطح برگ را به‌دنبال داشت. در پژوهش‌های مختلفی واکنش شاخص سطح برگ ارزن نسبت به زمان‌های مختلف کاشت مورد توجه قرار گرفته است. نواجی و همکاران (Nwajei *et al*., 2019) دریافتند که شاخص سطح برگ ارزن مرواریدی با تاخیر در کاشت، کاهش می‌یابد. در پژوهش آن‌ها بیش‌ترین و کم‌ترین شاخص سطح برگ ارزن مرواریدی به‌ترتیب در اردیبهشت (آوریل) و شهریور (آگوست) به‌دست آمد. در پژوهش دیگری اعلام شد که برای دستیابی به بیش‌ترین شاخص سطح برگ ارزن مرواریدی لازم است کشت آن در ۲۵ اردیبهشت (۱۵ می) انجام شود (El-Lattief, 2011). در آزمایش دیگری، بیش‌ترین شاخص سطح برگ سورگوم بین ۷٫۸ الی ۸٫۲ گزارش شد و این تفاوت در میزان شاخص سطح برگ به دریافت متفاوت تابش خورشیدی طی فصل رشد نسبت داده شد (Kukal and Irmak, 2019).

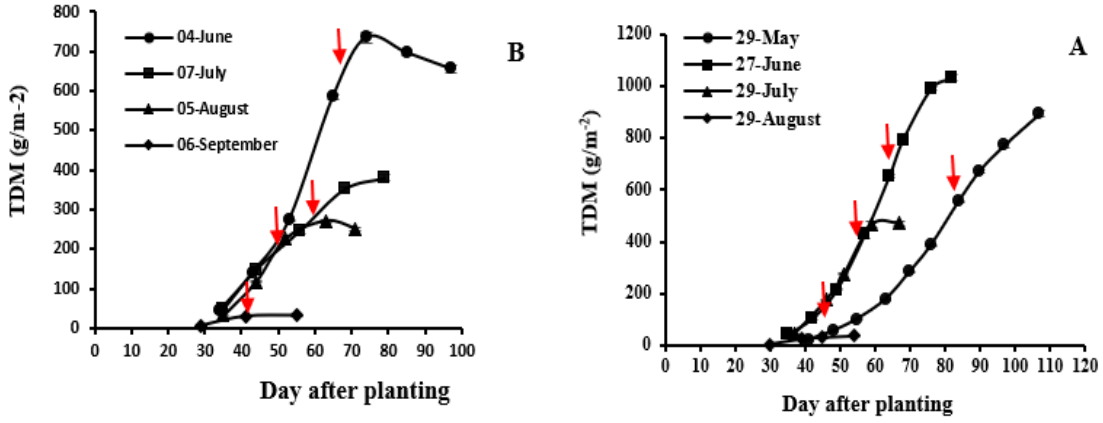
انباشت ماده خشک کل (TDM)

روند تغییرات ماده خشک اندام‌های هوایی ارزن پروسو نسبت به روزهای پس از کاشت در شکل ۳ (A و B)، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو سال زراعی مورد مطالعه روند تغییرات ماده خشک تقریباً به صورت سیگموئیدی (S شکل) بود که نشان می‌دهد در آغاز فصل رشد، سرعت انباشت ماده خشک کم است و با گذشت زمان و افزایش سطح برگ مقدار فتوسنتز خالص افزایش یافته و شیب انباشت ماده خشک شدت بیش‌تری پیدا می‌کند. سپس با افزایش سن گیاه و پیری برگ‌ها از شیب انباشت ماده خشک کاسته می‌شود تا به ثبات برسد (Tesar, 1984).

در این آزمایش تاریخ‌های مختلف کاشت اثرات متفاوتی را بر مقدار ماده خشک ارزن پروسو در دو سال آزمایش اعمال کردند (شکل ۳-A و B). بر این اساس در نخستین سال زراعی مورد مطالعه (۹۷-۱۳۹۶)، بیش‌ترین ماده خشک با میانگین ۱۰۳۰٫۸ گرم بر متر مربع به دومین تاریخ کاشت (ششم تیر) تعلق داشت که در مقایسه با نخستین زمان کاشت (هشتم خرداد) از افزایش معنی‌دار ۱۳٫۵ درصدی برخوردار بود (شکل ۴). این موضوع می‌تواند به شاخص سطح برگ و نقش موثر آن در دریافت تابش فعال فتوسنتزی مرتبط باشد (Haque and Hamid, 1998; Repková *et al*., 2009)، زیرا همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، در سال زراعی نخست، بیش‌ترین شاخص سطح برگ ارزن پروسو در دومین تاریخ کاشت به‌دست آمد. کرافورد و بایدینگر (Craufurd and Bidinger, 1988) نیز اعلام کردند که سطح برگ یک گیاه نقش موثری در مقدار ماده خشک تولیدی ایفا می‌کند. این پژوهش‌گران دریافتند که افزایش سطح برگ می‌تواند زمان دریافت نور خورشید را افزایش دهد و نقش به‌سزایی در افزایش عملکرد زیست‌توده داشته باشد. تاثیر مثبت افزایش شاخص سطح برگ بر مجموع زیست‌توده گیاه در آزمایش باچی و همکاران (Bacci *et al*., 1999) نیز به تایید رسیده است. در کنار شاخص سطح برگ، از دلایل افزایش معنی‌دار ماده خشک ارزن پروسو در دومین زمان کاشت (نسبت به سایر زمان‌های کاشت) می‌توان به افزایش معنی‌دار سرعت رشد گیاه زراعی (۳۵٫۵ گرم بر گرم در متر مربع) نیز در این تاریخ اشاره کرد. در این راستا، ینگ و همکاران (Ying *et al*., 1998) نیز طی گزارشی به ارتباط مثبت سرعت رشد گیاه زراعی و انباشت زیست‌توده اشاره داشتند. از طرفی، با تاخیر در کاشت از ششم تیر به هفتم مرداد و هفتم شهریور از انباشت ماده خشک ارزن پروسو به‌ترتیب ۵۴٫۳۹ و ۹۶٫۳۹ درصد کاسته شد (شکل ۴) و مقدار آن به‌ترتیب به ۴۷۰٫۰۷ و ۳۷٫۱۴ گرم بر متر مربع رسید (شکل ۳-A).

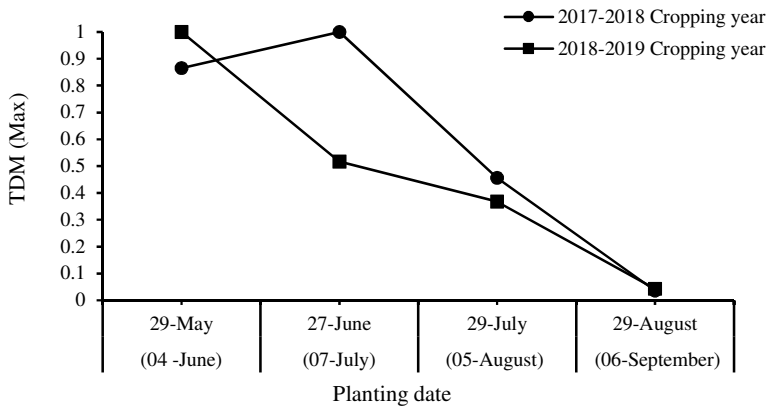
در دومین سال زراعی مورد بررسی (۹۸-۱۳۹۷)، بیش‌ترین ماده خشک ارزن پروسو با میانگین ۷۳۴٫۶۶ گرم بر متر مربع با کشت آن در ۱۴ خرداد به‌دست آمد که در مقایسه با سه تاریخ کاشت دیگر افزایش قابل توجهی را نشان داد (شکل ۳-B). از طرف دیگر، با تاخیر در کاشت از ۱۴ خرداد به ۱۶ تیر انباشت ماده خشک ارزن پروسو کاهش یافت و مقدار آن به ۳۸۰ گرم بر متر مربع رسید (شکل ۳-B) که در مقایسه با بیشینه ماده خشک به‌دست آمده، از کاهش ۴۸٫۲۷ درصدی برخوردار شد (شکل ۴).

این واکنش منفی در تاریخ‌های کاشت سوم و چهارم (به‌ترتیب ۱۴ مرداد و ۱۵ شهریور) نیز مشاهده شد (شکل ۳-B). به‌عبارت دیگر، به‌ازای هر روز تاخیر در کاشت از ۱۴ خرداد به ۱۴ مرداد و ۱۵ شهریور، انباشت ماده خشک ارزن پروسو به‌ترتیب ۱،۰۲ و ۱،۰۱ درصد کاهش یافت که در مقایسه با بیشینه مقدار ثبت شده از کاهش ۶۳،۲۴ (۱۴ مرداد) و ۹۵،۷۱ (۱۵ شهریور) درصدی برخوردار بود (شکل ۴). از دلایل کاهش ماده خشک در کشت‌های تاخیری می‌توان به کاهش دوره رشد رویشی و زایشی گیاه اشاره کرد و علت افزایش ماده خشک ارزن پروسو در نخستین زمان کاشت را می‌توان به بالاتر بودن شاخص سطح برگ (۳،۶۹)، سرعت رشد گیاه زراعی (۲۵،۹۹ گرم بر گرم در متر مربع) و سرعت جذب خالص (۱۸،۱۳ گرم بر متر مربع سطح برگ در روز) نسبت داد که مقدار قابل توجهی را در نخستین زمان کاشت داشتند.



شکل ۳- تغییرات انباشت ماده خشک ارزن پروسو در تاریخ‌های مختلف کشت در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ (A) و ۹۸-۱۳۹۷ (B). میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 3. Changes in dry matter accumulation of proso millet in different planting dates in two cropping years, 2017-18 (A), and 2018-19 (B). Vertical bars shows standard error.



شکل ۴- نسبت بیشینه کل ماده خشک ارزن پروسو طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷. ماه‌های ذکر شده در داخل پرانتز مربوط به دومین سال آزمایش است.

Figure 4. Maximum ratio of total dry matter of proso millet in two consecutive crop years, 2017-18 and 2018-19. The months represented in parentheses are related to the second year of the experiment.

سرعت جذب خالص ($\overline{NAR}$)

سرعت جذب و تحلیل خالص بیانگر مقدار ماده خشک خالص ساخته شده در واحد سطح برگ در واحد زمان است و برآوردی از فعالیت فتوسنتزی برگ‌ها را ارائه می‌دهد (Warren and Adams, 2005). این شاخص از توازن میان کربن به‌دست آمده از فتوسنتز و کربن مصرف شده در تنفس تعیین می‌شود (James, 2008) و تحت تاثیر مقدار تابش خورشیدی، توانایی برگ در فتوسنتز، شاخص سطح برگ، توزیع نور و مقدار تنفس گیاه قرار می‌گیرد (Nurmuliana and Akib, 2019).

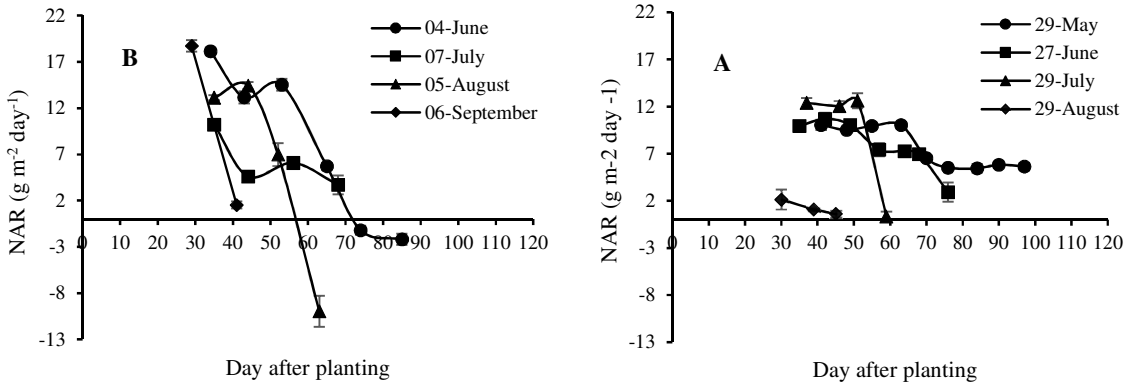
نتایج بررسی روند تغییرات سرعت جذب خالص گیاه ارزن پروسو در پاسخ به تاریخ‌های مختلف کاشت برای دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در نمودارهای رسم شده در شکل ۵ (A و B) ارایه شده است. بر همین اساس در هر دو سال زراعی و در هر چهار تاریخ کاشت مورد مطالعه، سرعت جذب و تحلیل خالص در ابتدای فصل رشد بیش‌ترین مقدار را داشت و پس از آن به‌تدریج طی فصل رشد روند نزولی پیدا کرد. به‌عبارت دیگر، در ابتدای فصل رشد، به‌علت جذب زیاد تابش خورشیدی، سرعت جذب و تحلیل خالص نیز افزایش یافت و سپس با افزایش شاخص سطح برگ و سایه اندازی برگ‌ها، راندمان تولیدی هر برگ و به‌دنبال آن میزان سرعت جذب و تحلیل خالص نیز کاهش یافت. این نتیجه با نتایج گزارش شده توسط هگن استالر و همکاران (Heggenstaller *et al.*, 2009) مطابقت داشت.

در نخستین سال زراعی (۹۷-۱۳۹۶)، تاریخ‌های کاشت مختلف اثر معنی‌داری بر بیشینه سرعت جذب خالص ارزن پروسو اعمال نکردند. با این‌حال، در دومین سال مورد مطالعه (۹۸-۱۳۹۷)، بیشینه سرعت جذب و تحلیل خالص در تاریخ‌های کاشت مختلف، متفاوت بود (شکل ۵-B). به‌عبارت دیگر، بیشینه مقدار $\overline{NAR}$ در ارزن پروسو به صورت مشترک در اولین (۱۸,۱۳ گرم بر متر مربع سطح برگ در روز) و چهارمین (۱۸,۷۱ گرم بر متر مربع سطح برگ در روز) زمان کاشت به‌دست آمد که به‌ترتیب ۳۴ و ۲۹ روز پس از کاشت به‌ثبت رسید (شکل ۵-B). افزایش سرعت جذب خالص ارزن پروسو در چهارمین زمان کاشت می‌تواند به کوچک‌تر بودن گیاهان (به‌دلیل ارتفاع و تعداد پنجه کم‌تر) در مراحل اولیه رشد برگردد که این موضوع سبب شد کلیه برگ‌های گیاه در معرض نور مستقیم خورشید قرار گیرند و سرعت جذب و تحلیل خالص افزایش یابد. از طرفی، علت افزایش سرعت جذب و تحلیل خالص در نخستین زمان کاشت را می‌توان به برقراری شرایط محیطی مناسب‌تر در این تاریخ (۱۴ خرداد) نسبت داد.

در این پژوهش با تاخیر در کاشت از ۱۴ خرداد به ۱۶ تیر، بیشینه مقدار سرعت جذب و تحلیل خالص کاهش یافت (۳۵,۴ درصد) و مقدار آن به ۱۰,۲۱ گرم بر متر مربع سطح برگ در روز رسید (شکل ۵-B). با این‌حال، تغییر تاریخ کاشت از ۱۶ تیر به ۱۴ مرداد واکنش متفاوتی را در ارزن پروسو ایجاد کرد و موجب افزایش معنی‌دار بیشینه $\overline{NAR}$ (۱۴,۴۴ گرم بر متر مربع سطح برگ در روز) در ارزن پروسو شد (شکل ۵-B). ویلسون (Wilson, 1981) معتقد است که سرعت جذب خالص، همبستگی بالایی با دریافت نور دارد. ویرک و همکاران (Virk *et al.*, 2020) نیز گزارش کردند که در صورت مطابقت دوره رشد گیاه با دماهای گرم‌تر، سرعت جذب و تحلیل خالص افزایش می‌یابد.

سرعت رشد گیاه زراعی ($\overline{CGR}$)

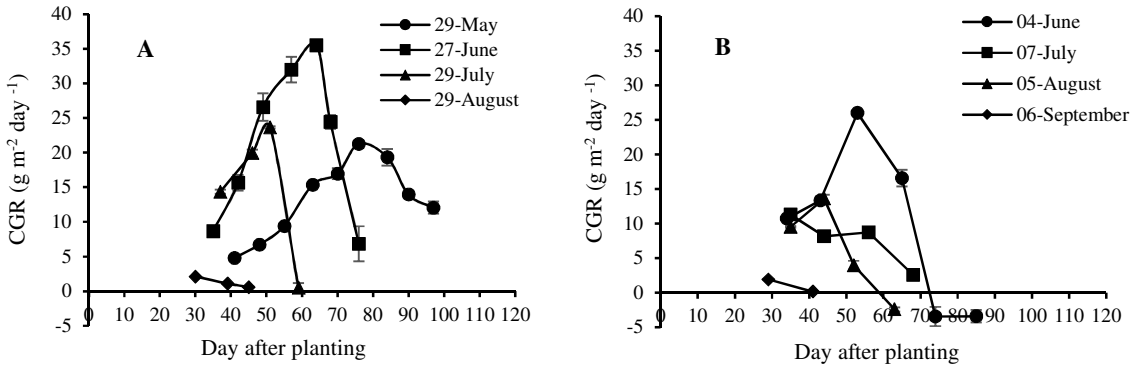
سرعت رشد گیاه زراعی بیانگر میزان انباشت ماده خشک در واحد سطح زمین در واحد زمان است و معمولاً بر حسب گرم در هر متر مربع از سطح زمین در روز بیان می‌شود (Pearce *et al.*, 1985; Watson, 1958). با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶ (A و B) می‌توان دریافت که در هر دو سال زراعی و در هر چهار تاریخ مورد مطالعه، سرعت رشد گیاه زراعی از روند مشابهی برخوردار بود. به این معنی که مقدار $\overline{CGR}$ در ابتدای فصل رشد کند بود و سپس با افزایش سطح برگ بر سرعت آن نیز افزوده شد و به بیشینه مقدار خود رسید. در ادامه، پس از دستیابی به بیش‌ترین مقدار $\overline{CGR}$، به‌دلیل افزایش تنفس، سایه‌اندازی بیش از حد برگ‌ها (افزایش شاخص سطح برگ بیش از مقدار مطلوب) و کاهش دریافت نور توسط سایه‌انداز، مقدار $\overline{CGR}$ نیز با شیب تندی کاهش یافت (Bunce, 1989). با گذشت زمان، روند کاهشی $\overline{CGR}$ تا انتهای فصل رشد ادامه یافت و به حد منفی (در دومین سال کاشت و در دو تاریخ ۱۴ خرداد و ۱۴ مرداد) رسید. منفی شدن سرعت رشد گیاه زراعی در انتهای دوره رشد گیاه می‌تواند مرتبط با پیر شدن و غیر فعال شدن برگ‌ها و نیز افزایش نسبت تنفس به فتوسنتز باشد (Haque and Hamid, 1998).



شکل ۵- تغییرات سرعت جذب خالص (NAR) ارزن پروسو در تاریخ‌های مختلف کشت در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ (A) و ۹۸-۱۳۹۷ (B). میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 5. Changes in net assimilation rate (NAR) of proso millet in different planting dates in two cropping years, 2017-18 (A), and 2018-19 (B). Vertical bars shows standard error.

با توجه به شکل ۶-A و B، در نخستین سال آزمایش (۹۷-۱۳۹۶)، بیش‌ترین مقدار $\overline{CGR}$ با میانگین ۳۵,۵ گرم بر گرم در متر مربع در دومین زمان کاشت (ششم تیر) به‌دست آمد که در مقایسه با بیشینه مقدار $\overline{CGR}$ در تاریخ کاشت اول (هشتم خرداد) افزایش ۴۰,۰۸ درصدی نشان داد. این واکنش می‌تواند مرتبط با شرایط محیطی مناسب‌تر (به‌لحاظ دما) در تاریخ کاشت دوم (ششم تیر) باشد. با این حال، با تاخیر در کاشت از ششم تیر به هفتم مرداد و هفتم شهریور، سرعت رشد گیاه زراعی به‌صورت قابل توجهی کاهش یافت و مقدار آن به‌ترتیب به ۲۳,۶۵ و ۲,۱۲ گرم بر گرم در متر مربع رسید. در دومین سال کاشت (۹۸-۱۳۹۷) نیز بیش‌ترین مقدار $\overline{CGR}$ با میانگین ۲۵,۹۹ گرم بر گرم در متر مربع در نخستین زمان کاشت (۱۴ خرداد) به ثبت رسید. از دلایل افزایش مقدار $\overline{CGR}$ می‌توان به بالاتر بودن مقدار فتوسنتز سایه‌انداز در روز و کاهش تنفس نگهداری در شب اشاره کرد (Ying *et al*., 1998). از طرفی، با تاخیر در کاشت از ۱۴ خرداد به ۱۵ شهریور از میزان $\overline{CGR}$ این گیاه ۹۲,۶۱ درصد (به‌ازای هر روز تاخیر ۰,۹۸ درصد) کاسته شد.



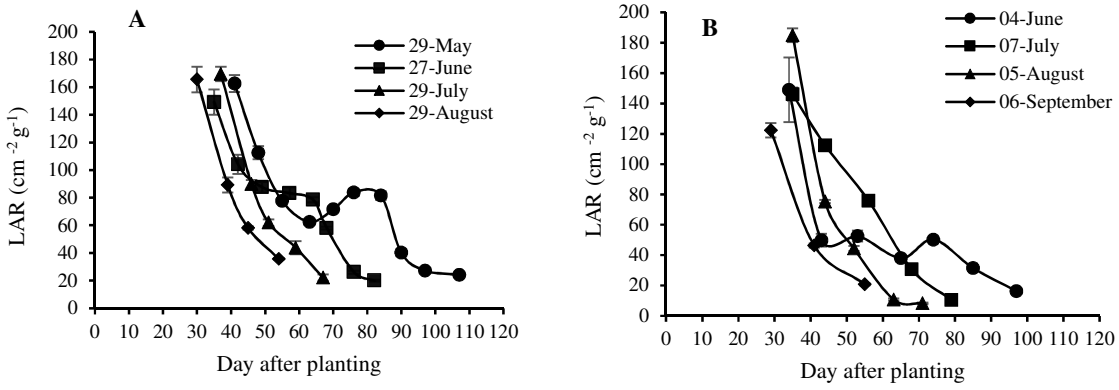
شکل ۶- تغییرات سرعت رشد (CGR) ارزن پروسو در تاریخ‌های مختلف کاشت در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ (A) و ۹۸-۱۳۹۷ (B). میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 6- Changes in crop growth rate (CGR) of proso millet in different planting dates in two cropping years, 2017-18 (A), and 2018-19 (B). Vertical bars shows standard error.

در این پژوهش در نخستین سال زراعی مورد مطالعه (۹۷-۱۳۹۶)، مقدار روز درجه مورد نیاز ارزن پروسو تا برداشت به‌ترتیب در تاریخ کاشت اول (هشتم خرداد) و دوم (ششم تیر) طی ۱۰۷ و ۹۲ روز تامین شد. با این حال، در دومین سال آزمایش (۹۸-۱۳۹۷)، طول دوره رشد ارزن پروسو برای تاریخ کاشت اول (۱۴ خرداد) و دوم (۱۶ تیر) به‌ترتیب ۹۷ و ۷۹ روز ثبت شد. در این فاصله زمانی، بخش زیادی از رشد گیاه با روزهای بلند منطبق شد که این امر به افزایش دوره رویشی و کاهش سهم مرحله زایشی از کل دوره رشد منتج شد. با تاخیر در کاشت از دومین زمان کاشت (در سال زراعی اول و دوم به‌ترتیب ششم و ۱۶ تیر)، بخش زیادی از طول دوره رشد گیاه به روزهای کوتاه‌تر برخورد کرد و ورود سریع‌تر گیاه به مرحله زایشی و کوتاه‌تر شدن دوره رشد را سبب شد. این حالت در تاریخ کاشت چهارم (در سال زراعی اول و دوم به‌ترتیب هفتم و ۱۵ شهریور) با شدت بیش‌تری مشاهده شد، به‌طوری که طول دوره رشد ارزن پروسو در این تاریخ برای سال زراعی اول و دوم به‌ترتیب ۵۴ و ۵۵ روز ثبت شد. به‌همین دلیل سرعت رشد گیاه در این تاریخ از کاهش قابل توجهی در مقایسه با سه تاریخ دیگر برخوردار شد. این کاهش می‌تواند مرتبط با مناسب نبودن پوشش گیاهی، پایین بودن درصد جذب نور و شرایط نامطلوب دمایی در انتهای فصل رشد باشد. از آنجا که سرعت رشد گیاه زراعی وابسته به تابش فعال فتوسنتزی دریافت شده و نیز مصرف آن توسط سایه‌انداز است (Haque and Hamid, 1998)، از این‌رو، می‌توان علت کاهش مقدار آن را در کشت‌های تاخیری مرتبط با کاهش شاخص سطح برگ دانست که این نتیجه با نتایج نورمولیانا و آکیب (Nurmuliana and Akib, 2019) و ویرک و همکاران (Virk *et al*., 2020) هم‌خوانی داشت.

نسبت سطح برگ ($\overline{\mathbf{LAR}}$)

نسبت سطح برگ به‌عنوان یک شاخص مورفولوژیک در نظر گرفته می‌شود و میزان سرمایه‌گذاری گیاه در برگ‌ها را در مقایسه با سایر اندام‌ها نشان می‌دهد و نشان دهنده پربرگی گیاهان است. روند تغییرات این مولفه نسبت به زمان معمولاً نزولی است (Hunt, 2017). تغییرات نسبت سطح برگ ارزن پروسو طی فصل رشد در دو سال زراعی و در چهار تاریخ کاشت در شکل ۷ (A و B) مقایسه شده است. چناچه ملاحظه می‌شود، در هر دو سال زراعی و در هر چهار تاریخ مورد مطالعه این نسبت روند طبیعی نزولی را حفظ کرده است. چنین روندی بیانگر این واقعیت است که در مراحل اولیه رشد، مواد فتوسنتزی اغلب صرف رشد و گسترش سطح برگ‌ها می‌شوند و سپس با آغاز رشد سریع سایر اندام‌های گیاهی، مواد فتوسنتزی بیش‌تری به اندام های غیر برگی اختصاص یافته و انباشت آن‌ها در برگ کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، بیش‌تر بودن $\overline{\mathrm{LAR}}$ به این مفهوم است که نسبت بافت‌های فتوسنتز کننده به مجموع بافت‌های تنفس کننده بیش‌تر است.



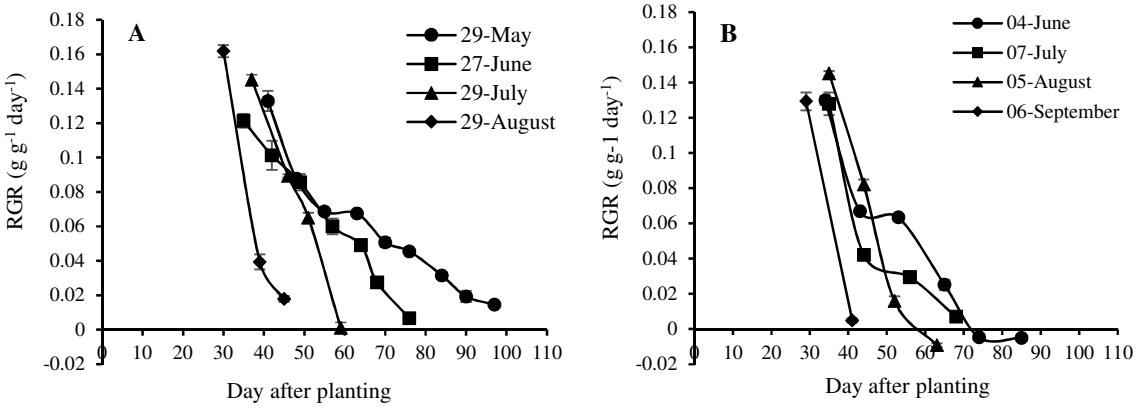
شکل ۷- تغییرات نسبت سطح برگ (LAR) ارزن پروسو در تاریخ‌های مختلف کاشت در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ (A) و ۹۸-۱۳۹۷ (B). میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 7. Changes in leaf area ratio (LAR) of proso millet in different planting dates in two cropping years, 2017-18 (A), and 2018-19 (B). Vertical bars shows standard error.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از مطالعه (شکل ۷-A و B)، در نخستین سال آزمایش (۹۷-۱۳۹۶)، بیش‌ترین نسبت سطح برگ با میانگین ۱۶۹,۴۹ سانتی‌متر مربع بر گرم در روز در سومین زمان کاشت (هفتم مرداد) به‌دست آمد که به‌لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با تاریخ کاشت اول (هشتم خرداد) و چهارم (هفتم شهریور) نشان نداد. کم‌ترین میزان $\overline{LAR}$ نیز با میانگین ۱۴۹,۱۵ سانتی‌متر مربع بر گرم در روز در تاریخ کاشت دوم (هفتم مرداد) به ثبت رسید. با این‌حال در دومین سال کاشت (۹۸-۱۳۹۷)، تاخیر در کاشت از ۱۴ خرداد به ۱۴ مرداد موجب افزایش معنی‌دار شاخص $\overline{LAR}$ در ارزن پروسو شد و بیشینه مقدار آن از ۱۴۸,۸۸ به ۱۸۴,۸۸ سانتی‌متر مربع بر گرم در روز رسید. از طرفی، با تاخیر در زمان کاشت از ۱۴ مرداد به ۱۵ شهریور از مقدار $\overline{LAR}$ به‌مقدار قابل توجهی کاسته شد (۱۲۲,۲ سانتی‌متر مربع بر گرم در روز). در همین راستا، صفری و همکاران (Safari *et al*., 2008) نسبت سطح برگ را به‌عنوان عاملی برای کیفیت بالای محصول عنوان کردند. در آزمایش آن‌ها روند تغییرات نسبت سطح برگ ارزن دم روباهی در تمامی تاریخ‌های کاشت (یکم، ۱۶ و ۳۱ تیر) به‌صورت نزولی بود و بالاترین نسبت سطح برگ در ابتدای فصل رشد به‌دست آمد و با مرور زمان مقدار آن کاهش یافت.

سرعت رشد نسبی ($\overline{RGR}$)

سرعت رشد نسبی بیانگر وزن خشک اضافه شده نسبت به وزن اولیه در یک فاصله زمانی بر حسب گرم بر گرم بر روز است. به بیان دیگر، سرعت رشد نسبی نشان می‌دهد که هر گرم از وزن خشک گیاه در هر روز چه مقدار افزایش داشته است (Hunt, 2017; Nurmuliana and Akib, 2019). با توجه به شکل ۸ (A و B) می‌توان دریافت که سرعت رشد نسبی در هر چهار تاریخ کاشت و در هر دو سال آزمایش، از روند مشابهی طی فصل رشد برخوردار بود. به‌این معنی که در ابتدای فصل رشد، سرعت رشد نسبی در بیشینه مقدار خود قرار گرفت و سپس با گذشت زمان مقدار آن کاهش یافت و تا حد منفی نزول کرد (در سال دوم برای تاریخ کاشت اول و سوم). منفی شدن $\overline{RGR}$ می‌تواند به افزایش تعداد برگ‌های پیر مرتبط باشد (Karimi and Siddique, 1991). افزایش سرعت رشد نسبی کمی پس از سبز شدن را می‌توان به افزایش تعداد و اندازه برگ و نیز افزایش وزن ساقه نسبت داد. از دلایل کاهش سرعت رشد نسبی می‌توان به افزایش سن برگ‌های پایین‌تر، در سایه قرار گرفتن آن‌ها و نیز افزایش بافت‌های ساختمانی که در فتوسنتز نقشی ندارند، اشاره کرد (Tesar, 1984; Osaki *et al*., 1992).



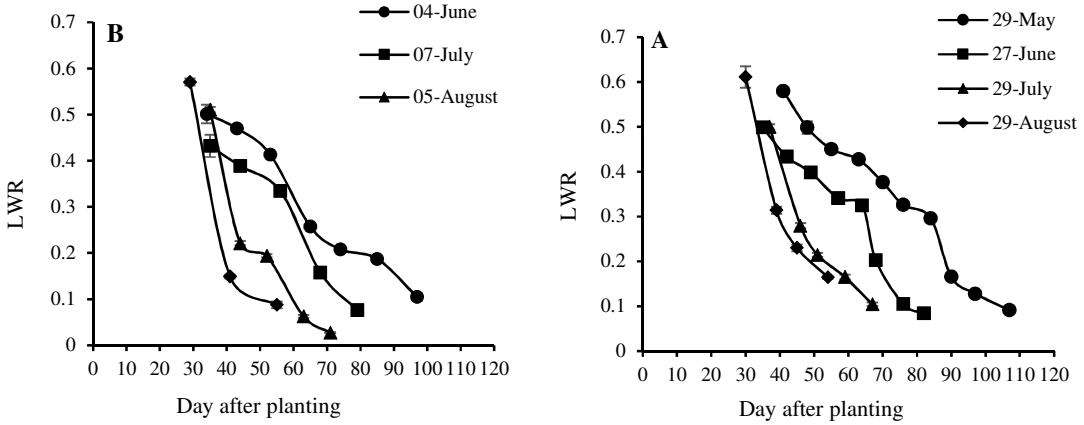
شکل۸- تغییرات سرعت رشد نسبی (RGR) ارزن پروسو در تاریخ‌های مختلف کاشت در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ (A) و ۹۸-۱۳۹۷ (B). میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 8. Changes in relative growth rate (RGR) of proso millet in different planting dates in two cropping years, 2017-18 (A), and 2018-19 (B). Vertical bars shows standard error.

نتایج آزمایش (شکل ۸- A و B) نشان داد که در نخستین سال کاشت (۹۷-۱۳۹۶)، بیش‌ترین سرعت رشد نسبی ارزن پروسو با میانگین ۰,۱۶ گرم بر گرم در روز در تاریخ کاشت چهارم (هفتم شهریور) و کم‌ترین مقدار آن (۰,۱۲ گرم بر گرم در روز) در تاریخ کاشت دوم (ششم تیر) به‌دست آمد. با این‌حال، در دومین سال آزمایش (۹۸-۱۳۹۷)، واکنش متفاوتی به‌لحاظ زمان دستیابی به بیشینه مقدار $\overline{RGR}$ مشاهده شد، به‌طوری که، بیش‌ترین سرعت رشد نسبی (۰,۱۴ گرم بر گرم در روز) در تاریخ کاشت سوم (۱۴ مرداد) به‌ثبت رسید که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با سه تاریخ کاشت دیگر داشت. به‌عبارت دیگر، با تاخیر در کاشت از ۱۴ خرداد به ۱۴ مرداد، سرعت رشد نسبی ارزن پروسو افزایش مثبت و معنی‌داری نشان داد (۱۶,۶۶ درصد)، اما در صورت تاخیر در کاشت از ۱۴ مرداد به ۱۵ شهریور از سرعت رشد نسبی این گیاه کاسته خواهد شد (۱۶,۶۶ درصد). علت کاهش سرعت رشد نسبی در کشت‌های تاخیری، وجود شرایط محیطی نامناسب برای رشد ارزن به‌لحاظ طول روز، دما، تابش خورشیدی و رطوبت نسبی است (Karadavut *et al*., 2010). در همین راستا، نتایج مطالعه الیاس‌پور و همکاران (Eliaspour *et al*., 2014) در رابطه با تاثیر زمان‌های مختلف کاشت بر شاخص‌های رشد ذرت نیز نشان داد که تاخیر در کاشت از میزان $\overline{RGR}$ می‌کاهد.

نسبت وزن برگ ($\overline{LWR}$)

نسبت وزن برگ (LWR) از نسبت بین ماده خشک برگ به ماده خشک کل گیاه به‌دست می‌آید. این شاخص نشان دهنده نسبت بافت‌های فتوسنتزی به وزن گیاه است (Warren and Adams, 2005) و مقدار آن بین صفر و یک گزارش شده است (Hunt, 2017). با توجه به نتایج به‌دست آمده از شکل ۹ (A و B) می‌توان این گونه استنباط کرد که در هر دو سال آزمایش و در تمامی تاریخ‌های کاشت، نسبت وزن برگ در ابتدای فصل رشد در بیشینه مقدار خود قرار دارد و سپس با گذشت زمان روند نزولی به‌خود می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، در ابتدای فصل رشد، بخش زیادی از مواد فتوسنتزی ساخته شده صرف تولید برگ می‌شود و به‌دنبال آن نسبت وزن برگ در بیش‌ترین مقدار خود قرار گرفت. سپس با افزایش سن گیاه و اختصاص مواد فتوسنتزی به ساقه و دیگر اجزای گیاه، نسبت وزن برگ طی فصل رشد کاهش یافت. کاهش نسبت وزن برگ طی دوره رشد نشان می‌دهد که گیاهان برگ‌های خود را طی این دوره از دست می‌دهند، اما به همان نسبتی که آن‌ها را از دست می‌دهند، قادر به تولید مجدد برگ‌ها نیستند (Zavareh, 1998).



شکل ۹- تغییرات نسبت وزن برگ (LWR) ارزن پروسو در تاریخ‌های مختلف کاشت در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ (A) و ۹۸-۱۳۹۷ (B). میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 9. Changes in leaf weight ratio (LWR) of proso millet in different planting dates in two cropping years, 2017-18 (A), and 2018-19 (B). Vertical bars shows standard error.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش (شکل ۹-A و B)، بیش‌ترین نسبت وزن برگ در نخستین سال کاشت (۹۷-۱۳۹۶) با کاشت ارزن پروسو در چهارمین زمان کاشت (هفتم شهریور) به‌دست آمد (۰،۶۱ واحد) که در مقایسه با بیشینه مقدار $\overline{LWR}$ در تاریخ کاشت اول، دوم و سوم به‌ترتیب افزایش ۶،۵۵، و ۱۹،۶۷ و ۱۹،۶۷ درصدی داشت. به‌همین ترتیب در دومین سال زراعی (۹۸-۱۳۹۷) نیز بیش‌ترین مقدار نسبت وزن برگ (۰،۵۷ واحد) با کاشت ارزن پروسو در تاریخ کاشت چهارم (۱۵ شهریور) به‌دست آمد و افزایش قابل توجهی را نسبت به بیشینه مقدار ثبت شده در تاریخ کاشت اول (۰،۵ واحد)، دوم (۰،۴۳ واحد) و سوم (۰،۵۱ واحد) نشان داد (جدول ۳). از آنجا که افزایش نور تاثیر منفی بر شاخص $\overline{LWR}$ دارد (Meziane and Shipley, 1999)، بنابراین علت افزایش نسبت وزن برگ در چهارمین تاریخ کاشت را می‌توان به کاهش نور ورودی در این تاریخ نسبت داد.

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این آزمایش نشان داد که زمان‌های مختلف کاشت می‌توانند با تغییر طول روز، دما، رطوبت قابل دسترس در خاک و شدت و نفوذ نور در جامعه گیاهی بر میزان فتوسنتز، تنفس، مقدار ماده خشک تولیدی و در نهایت شاخص‌های رشد تاثیرگذار باشند. بیش‌ترین ماده خشک ارزن پروسو در نخستین سال زراعی مورد مطالعه (۱۰۳۰،۸ گرم بر متر مربع) با کشت آن در دومین تاریخ (ششم تیر) حاصل شد که در مقایسه با اولین زمان کاشت (هشتم خرداد) از افزایش ۱۳،۵ درصدی برخوردار بود. افزایش ماده خشک ارزن پروسو در تاریخ کاشت دوم را می‌توان به نقش موثر شاخص سطح برگ (۵،۱۴) و سرعت رشد گیاه زراعی (۳۵،۵ گرم بر گرم در متر مربع) نسبت داد که بیش‌ترین مقدار آن‌ها در تاریخ کاشت دوم به‌دست آمد. از طرفی در دومین سال آزمایش، میزان ماده خشک ارزن پروسو با تاخیر در کاشت از ۱۴ خرداد کاسته شد، به‌گونه‌ای که بیش‌ترین ماده خشک آن در تاریخ کاشت اول (با میانگین ۷۹۰،۷۲ گرم بر متر مربع) و کم‌ترین مقدار آن در تاریخ کاشت چهارم (با میانگین ۳۱،۵۱ گرم بر متر مربع) به‌دست آمد. این افزایش ماده خشک را می‌توان به نقش موثر شاخص سطح برگ (۳،۶۹)، سرعت رشد محصول (۲۵،۹۹ گرم بر گرم در متر مربع) و سرعت جذب و تحلیل خالص (۱۸،۱۳ گرم بر متر مربع سطح برگ در روز) نسبت داد. افزایش شاخص‌های رشد بالا در کشت زودهنگام را می‌توان به افزایش طول دوره رشد گیاه (به‌ویژه دوره رشد رویشی) نسبت داد که فرصت بیش‌تری را در اختیار آن قرار می‌دهد تا محصول بیش‌تری تولید کند. در مجموع با توجه به نتایج به‌دست آمده از دو سال اجرای آزمایش، پیشنهاد می‌شود که به‌منظور دستیابی به بیشینه ماده خشک ارزن پروسو، بازه زمانی کاشت آن از اواسط خرداد تا اوایل تیرماه در نظرگرفته شود.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسنده (گان) اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تا کنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Abbas, G., Fatima, Z., Riaz, F., Iqbal, P., Hussain, S., Zakir, I., Iqbal, M. and Ahmad, S. 2019. Study of sowing dates and hybrids effect in maize-based cropping system under arid conditions of Southern Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Life & Social Sciences,* 17(1), pp. 24-31.

Addo-Quaye, A., Darkwa, A. and Ocloo, G. 2011. Growth analysis of component crops in a maize-soybean intercropping system as affected by time of planting and spatial arrangement. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*, 6(6), pp. 34-44.

Amanullah, M.J.H., Nawab, K. and Ali, A. 2007. Response of specific leaf area (SLA), leaf area index (LAI) and leaf area ratio (LAR) of maize (*Zea mays* L.) to plant density, rate and timing of nitrogen application. *World Applied Sciences Journal,* 2(3), pp. 235-243.

Anderson, R. 1994. Planting date effect on no-till proso millet. *Journal of Production Agriculture,* 7(4), pp. 454-458. https://doi.org/10.2134/jpa1994.0454.

Bacci, L., Cantini, C., Pierini, F., Maracchi, G. and Reyniers, F. 1999. Effects of sowing date and nitrogen fertilization on growth, development and yield of a short day cultivar of millet (*Pennisetum glaucum* L.) in Mali. *European Journal of Agronomy*, 10(1), pp. 9-21. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00046-X.

Baltensperger, D.D. 2002. Progress with proso, pearl and other millets. *Trends in New Crops and New Uses*, pp. 100-103.

Blackman, V. 1919. The compound interest law and plant growth. *Annals of Botany*, 33(131), pp. 353-360. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a089727.

Bonelli, L.E., Monzon, J.P., Cerrudo, A., Rizzalli, R.H. and Andrade, F.H. 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. *Field Crops Research*, 198, pp. 215-225. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.003.

Briggs, G., Kidd, F. and West, C. 1920. A quantitative analysis of plant growth: Part II. *Annals of Applied Biology*, 7(2-3), pp. 202-223. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1920.tb05308.x.

Bruns, H. A. and Abbas, H. 2006. Planting date effects on Bt and non-Bt corn in the mid-south USA. *Agronomy Journal,* 98(1), pp. 100-106. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0143.

Bunce, J.A. 1989. Growth rate, photosynthesis and respiration in relation to leaf area index. *Annals of Botany,* 63(4), pp. 459-463. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087766.

Castro, B., Riley, T. and Leonard, B. 2000. Evaluation of planting date, sorghum hybrid, and insecticide treatment on sorghum midge (Diptera: Cecidomyiidae) management in Northeast Louisiana. *Journal of Economic Entomology,* 93(4), pp. 1199-1206. https://doi.org/10.1603/0022-0493-93.4.1199.

Craufurd, P. and Bidinger, F. 1988. Effect of the duration of the vegetative phase on shoot growth, development and yield in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). *Journal of Experimental Botany*, 39(1), pp. 124-139. https://doi.org/10.1093/jxb/39.1.124.

Craufurd, P.Q., Subedi, M. and Summerfield, R.J. 1997. Leaf appearance in cowpea: effects of temperature and photoperiod. *Crop Science*, 37(1), pp. 167-171. https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010029x.

Dahmardeh, M. and Dahmardeh, M. 2010. The effect of sowing date and some growth physiological index on grain yield in three maize hybrids in Southeastern Iran. *Asian Journal of Plant Sciences*, 9(7), pp. 432-436. https://doi.org/10.3923/ajps.2010.432.436.

Dera, J. and Mativavarira, M. 2018. Effect of sowing date and variety on sorghum yield in different regions of Zimbabwe. *Journal of Advanced Plant Sciences,* pp. 1-6 .

El-Lattief, E.A. 2011. Growth and fodder yield of forage pearl millet in newly cultivated land as affected by date of planting and integrated use of mineral and organic fertilizers. *Asian Journal of Crop Science*, 3, pp. 35-42. https://doi.org/10.3923/ajcs.2011.35.42.

Eliaspour, S., Shirzadi, F., Zandian, F. and Gholami, A. 2014. The effect of plant date and density on the growth index of maize variety (KSC704) in tropical region of Kermanshah province. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 5(6), pp. 93-102.

Elings, A. 2000. Estimation of leaf area in tropical maize. *Agronomy Journal,* 92(3), pp. 436-444. https://doi.org/10.2134/agronj2000.923436x.

Evans, G.C. 1972. The Quantitative Analysis of Plant Growth. University of California Press, USA.

Ferrise, R., Triossi, A., Stratonovitch, P., Bindi, M. and Martre, P. 2010. Sowing date and nitrogen fertilisation effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: An experimental and simulation study. *Field Crops Research*, 117(2-3), pp. 245-257. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.03.010.

Gardner, F.P., Pearce, R.B. and Mitchell, R.L. 2017. Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press, USA.

Gueye, M., Kanfany, G., Fofana, A., Noba, K. and Grove, J. 2015. Effect of planting date on growth and grain yield of fonio millet (*Digitaria exilis* Stapf) in the Southeast of Senegal. *International Journal of Biological and Chemical Sciences,* 9(2), pp. 581-592. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i2.1.

Haque, M. and Hamid, A. 1998. Effect of nitrogen on growth of intercropped maize and sweet potato. *Indian Journal of Plant Physiology*, 3(4), pp. 260-264.

Heggenstaller, A.H., Liebman, M. and Anex, R.P. 2009. Growth analysis of biomass production in sole-crop and double-crop corn systems. *Crop Science*, 49(6), pp. 2215-2244. https://doi.org/10.2135/cropsci2008.12.0709.

Hunt, R. 2017. Growth Analysis, Individual Plants. In: Thomas, B., Murray, B.G. and Murphy, D.J. (Eds.). Encyclopedia of Applied Plant Sciences. Second Edition. Academic Press, Oxford. pp. 421-429.

James, J. 2008. Effect of soil nitrogen stress on the relative growth rate of annual and perennial grasses in the Intermountain West. *Plant and Soil*, 310(1-2), pp. 201-210. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9645-x.

Jan, A., Khan, I., Ali, Sh., Janm A. and Sohail, A. 2015. Sowing dates and sowing methods influenced on growth yiled and yield components of pearl millet under rainfied conditions. *Journal of Environment and Earth Science,* 5(1), pp. 105-109.

Jia, Y., Wang, J., Qu, Z., Zou, D., Sha, H., Liu, H., Sun, J., Zheng, H., Yang, L. and Zhao, H. 2019. Effects of low water temperature during reproductive growth on photosynthetic production and nitrogen accumulation in rice. *Field Crops Research*, 242, pp. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107587.

Kalra, N., Chakraborty, D., Sharma, A., Rai, H., Jolly, M., Chander, S., Kumar, P.R., Bhadraray, S., Barman, D. and Mittal, R. 2008. Effect of increasing temperature on yield of some winter crops in northwest India. *Current Science,* 94(1), pp. 82-88 .

Karadavut, U., Kökten, K. and Kavurmaci, Z. 2010. Comparison of relative growth rates in silage corn cultivars. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*, 5(3), pp. 223-228. https://doi.org/10.3923/ajava.2010.223.228.

Karimi, M. and Siddique, K. 1991. Crop growth and relative growth rates of old and modern wheat cultivars. *Australian Journal of Agricultural Research*, 42(1), pp. 13-20. https://doi.org/10.1071/AR9910013.

Karimzadeh Soureshjani, H., Tadayon, M.R., Shalalvand, M. and Fardi, Y. 2019. Evaluation of growth indices and qualitative traits of maize hybrids at different sowing dates in Varamin, Iran. *Journal of Crop Production and Processing*, 8(4), pp. 29-44. [In Persian]. http://dx.doi.org/10.29252/jcpp.8.4.29.

Koller, H.R. 1972. Leaf area-leaf weight relationships in the soybean canopy. *Crop Science*, 12(2), pp.180-183. https://doi.org/10.2135/cropsci1972.0011183X001200020007x.

Kouchaki, A.R. and Nasiri, M.M. 2008. Impacts of climate change and CO_2 concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(1), pp. 139-153. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20081472.1387.6.1.15.6.

Kukal, M. and Irmak, S. 2019. Comparative canopy growth dynamics in four row crops and their relationships with allometric and environmental determinants. *Agronomy Journal*, 111(4), pp. 1799-1816. https://doi.org/10.2134/agronj2019.01.0017.

Loveys, B., Scheurwater, I., Pons, T., Fitter, A. and Atkin, O. 2002. Growth temperature influences the underlying components of relative growth rate: an investigation using inherently fast-and slow-growing plant species. *Plant, Cell and Environment*, 25(8), pp. 975-988. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00879.x.

Lu, H.D., Xue, J.Q. and Guo, D.W. 2017. Efficacy of planting date adjustment as a cultivation strategy to cope with drought stress and increase rainfed maize yield and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, 179, pp. 227-235. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.001.

Maas, A., Hanna, W. and Mullinix, B. 2007. Planting date and row spacing affects grain yield and height of pearl millet Tifgrain 102 in the Southeastern coastal plain of the United States. *Journal of SAT Agricultural Research*, 5(1), pp. 1-4.

Maurya, S., Nath, S., Patra, S.S. and Rout, S. 2015. Influence of weather parameters on pearl millet (*Pennistum glaucum* L.) varieties at Allahabad. *Journal of Plant Development Sciences*, 7(12), pp. 863-868.

Meziane, D. and Shipley, B. 1999. Interacting components of interspecific relative growth rate: constancy and change under differing conditions of light and nutrient supply. *Functional Ecology*, 13(5), pp. 611-622. https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00359.x.

Moshaver, E., Madani, H., Emam, Y., Nour Mohamadi, Gh. and Heidari Sharifabad, H. 2016. Effect of planting date and density on amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) growth indices and forage yield. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 4(5), pp. 541-547. http://dx.doi.org/10.18006/2016.4(5).541.547.

Muhammad, A., Basit, A. and Misbahullah. 2019. Effect of climatic zones and sowing dates on maize emergence and leaf parameters. *Acta Ecologica Sinica*, 39(6), pp. 461-466. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.11.005.

Nurmuliana, N. and Akib, M.A. 2019. Plant growth analysis of Jack Been (*Canavalia ensiformis* L.) at different spacing to determine the application time of cutback technology. *Agrotech Journal*, 4(1), pp. 1-7. http://dx.doi.org/10.31327/atj.v4i1.907.

Nwajei, S.E., Omoregie, A.U. and Ogedegbe, F.O. 2019. Effects of planting dates on the growth and grain yield of two indigenous varieties of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in a forest-savanna transition zone of Edo State, Nigeria. *Acta Agriculturae Slovenica*, 114(2), pp. 169-181. http://dx.doi.org/10.14720/aas.2019.114.2.3.

Osaki, M., Shinano, T. and Tadano, T. 1992. Carbon-nitrogen interaction in field crop production. *Soil Science and Plant Nutrition*, 38(3), pp. 553-564. https://doi.org/10.1080/00380768.1992.10415087.

Parthasarathi, T., Velu, G. and Jeyakumar, P. 2013. Impact of crop heat units on growth and developmental physiology of future crop production: A review. *Journal of Crop Science and Technology*, 2(1), pp. 2319-3395. https://doi.org/10.37591/rrjocst.v2i1.2185.

Patterson, D.T. 1993. Effects of day and night temperature on goatsrue (*Galega officinalis*) and alfalfa (*Medicago sativa*) growth. *Weed Science*, 41(1), pp. 38-45. https://doi.org/10.1017/S0043174500057556.

Pearce, R.B., Mitchell, R.L. and Gardner, F.P. 1985. Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press, USA.

Poorter, H. and Remkes, C. 1990. Leaf area ratio and net assimilation rate of 24 wild species differing in relative growth rate. *Oecologia*, 83, pp. 553-559. https://doi.org/10.1007/BF00317209.

Prasad, P., Djanaguiraman, M., Stewart, Z. and Ciampitti, I. 2020. Agroclimatology of maize, sorghum, and pearl millet. *Agroclimatology*: *Linking Agriculture to Climate,* 60, pp. 201-241. https://doi.org/10.2134/agronmonogr60.2016.0005.

Reddy, K. and Visser, P. 1993. Late planting effects on early versus late pearl millet genotypes in Niger. *Experimental Agriculture,* 29(1), pp. 121-129. https://doi.org/10.1017/S0014479700020469.

Repková, J., Brestič, M. and Olšovská, K. 2009. Leaf growth under temperature and light control. *Plant, Soil and Environment*, 55, pp. 551-557. https://doi.org/10.17221/93/2009-PSE.

Russelle, M., Wilhelm, W., Olson, R. and Power, J.F. 1984. Growth analysis based on degree days 1. *Crop science*, 24(1), pp. 28-32. https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400010007x.

Safari, F., Galeshi, S., Torbatinejad, N.M. and Mosavat, S.A. 2008. The effect of sowing date and plant density on forage yield of foxtail millet (*Setaria italica*). *The Journal of Agriculture and Natural Resources Sciences*, 15(5), pp. 26-38. [In Persian]

Sinclair, T., Gilbert, R., Perdomo, R., Shine Jr, J., Powell, G. and Montes, G. 2004. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *Field Crops Research*, 88(2-3), pp. 171-178. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.12.005.

Srivastava, A.K., Mboh, C.M., Gaiser, T., Webber, H. and Ewert, F. 2016. Effect of sowing date distributions on simulation of maize yields at regional scale–A case study in Central Ghana, West Africa. *Agricultural Systems*, 147, pp. 10-23. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.012.

Tesar, M.B. 1984. Physiological Basis of Crop Growth and Development. First Edition. American Society of Agronomy, USA.

Turgut, I., Duman, A., Wietgrefe, G. and Acikgoz, E. 2006. Effect of seeding rate and nitrogen fertilization on proso millet under dryland and irrigated conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(12), pp. 2119-2129. https://doi.org/10.1080/01904160600972605.

Twidwell, E., Boe, A. and Kephart, K. 1992. Planting date effects on yield and quality of foxtail millet and three annual legumes. *Canadian Journal of Plant Science*, 72(3), pp. 819-827. https://doi.org/10.4141/cjps92-098.

Ullah, A., Ahmad, A., Khaliq, T. and Akhtar, J. 2017. Recognizing production options for pearl millet in Pakistan under changing climate scenarios. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(4), pp. 762-773. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61450-8.

Virk, G., Pilon, C., Snider, J.L. and Tubbs, R.S. 2020. Early-season vigor in peanuts is dependent on leaf area responses to temperature. *Agronomy Journal*, 112(2), pp. 899-910. https://doi.org/10.1002/agj2.20017.

Van Roekel, R.J. and Coulter, J.A. 2011. Agronomic responses of corn to planting date and plant density. *Agronomy Journal*, 103(5), pp. 1414-1422. https://doi.org/10.2134/agronj2011.0071.

Ventura, F., Vignudelli, M., Poggi, G.M., Negri, L. and Dinelli, G. 2020. Phenological stages of Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) encoded in BBCH scale. *International Journal of Biometeorology*, 64, pp. 1167-1181. https://doi.org/10.1007/s00484-020-01891-3.

Warren, C.R. and Adams, M.A. 2005. What determines interspecific variation in relative growth rate of Eucalyptus seedlings? *Oecologia*, 144, pp. 373-381. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0092-6.

Watson, D.J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11(41), pp. 41-76. 10.1093/oxfordjournals.aob.a083148.

Watson, D.J. 1958. The dependence of net assimilation rate on leaf-area index. *Annals of Botany*, 22(1), pp. 37-54. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083596.

Wen, Y., Liu, J., Meng, X., Zhang, D. and Zhao, G. 2014. Characterization of proso millet starches from different geographical origins of China. *Food Science and Biotechnology*, 23(5), pp. 1371-1377. https://doi.org/10.1007/s10068-014-0188-z.

Wiedenfeld, B. and Matocha, J. 2010. Planting date, row configuration and plant population effects on growth and yield of dryland sorghum in subtropical South Texas. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(1), pp. 39-47. https://doi.org/10.1080/03650340902922696.

Williams, M.M. and Lindquist, J.L. 2007. Influence of planting date and weed interference on sweet corn growth and development. *Agronomy journal*, 99(4), pp. 1066-1072. https://doi.org/10.2134/agronj2007.0009.

Wilson, J.W. 1981. Analysis of growth, photosynthesis and light interception for single plants and stands. *Annals of Botany*, 48(4), pp. 507-512. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086154.

Xie, Y., Wang, P., Bai, X., Khan, J., Zhang, S., Li, L. and Wang, L. 2017. Assimilation of the leaf area index and vegetation temperature condition index for winter wheat yield estimation using Landsat imagery and the CERES-Wheat model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 246, pp. 194-206. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.015.

Ying, J., Peng, S., He, Q., Yang, H., Yang, C., Visperas, R.M. and Cassman, K.G. 1998. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments: I. Determinants of grain and dry matter yields. *Field Crops Research*, 57(1), pp. 71-84. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00077-X.

Zavareh, M. 1998. Evaluation of some morphological and physiological characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L) and rape (*B. campesiris* L.) genotypes and their correlations with yield and yield components M.Sc. Dissertation. Shiraz University, Shiraz, Iran. [In Persian].

Zhang, L., Richards, R., Condon, A., Liu, D. and Rebetzke, G. 2015. Recurrent selection for wider seedling leaves increases early biomass and leaf area in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 66(5), pp. 1215-1226. https://doi.org/10.1093/jxb/eru468.

Zhang, Z., Christensen, M., Nan, Z., Whish, J. P., Bell, L. W., Wang, J., Wang, Z., and Sim, R. 2019a. Plant development and solar radiation interception of four annual forage plants in response to sowing date in a semi-arid environment. *Industrial Crops and Products*, 131, pp. 41-53. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.028.

Zhang, Z., Yu, K., Jin, X., Nan, Z., Wang, J., Niu, X., Whish, J. P., Bell, L. W., and Siddique, K. H. 2019b. Above-and belowground dry matter partitioning of four warm-season annual crops sown on different dates in a semiarid region. *European Journal of Agronomy*, 109, pp. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125918.