

مقاله علمی-پژوهشی

## بررسی اثر کم آبیاری (DI) و آبیاری بخشی ناحیه ریشه (PRD) بر بهره‌وری آب و خصوصیات فتوسنتزی گیاه ماش (*Vigna radiate L.*)

نسرین رضایی<sup>۱</sup>، حمزه‌علی علیزاده<sup>۲\*</sup>، یاسر علی‌زاده<sup>۳</sup>، احسان اله زیدعلی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

### چکیده

به منظور بررسی اثر کم آبیاری و آبیاری بخشی ناحیه ریشه بر بهره‌وری آب و پارامترهای فتوسنتزی گیاه ماش، آزمایشی در سال ۱۳۹۹ به صورت کرت خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ایلام اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) به عنوان تیمارهای اصلی و سه روش آبیاری (معمولی، PRD ثابت و PRD متغیر) به عنوان تیمارهای فرعی بود. نتایج نشان داد که اثر تنش آبی بر بهره‌وری آب، کارایی کربوکسیلاسیون و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل تنش آبی و روش آبیاری بر بهره‌وری آب و کارایی کربوکسیلاسیون معنی‌دار بود. در همه روش‌های آبیاری بیشترین مقدار بهره‌وری آب در سطح آبی ۷۵ درصد حاصل شد. بیشترین مقدار بهره‌وری آب به مقدار  $0.49 \text{ Kg/m}^3$  در سطح آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی و روش PRD متغیر اتفاق افتاد. در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی بین مقدار بهره‌وری آب روش آبیاری معمولی و PRD متغیر تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. در تنش‌های آبی شدید بهره‌وری آب در روش PRD متغیر به طور معنی‌دار از دو روش دیگر بیشتر بود. بنابراین در شرایط کم آبیاری، استفاده از روش PRD، در کاهش اثرات تنش خشکی موثر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ترقق، تنش خشکی، ضریب همبستگی، کارایی کربوکسیلاسیون، کارایی مصرف ذاتی آب

### مقدمه

با شناسایی صفاتی است که می‌تواند به بهبود تحمل به خشکی کمک کند (Schultz, 2006). گیاهان مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی پیچیده‌ای را برای تنظیم و سازگاری با انواع تنش‌های محیطی ایجاد کرده‌اند (Osakabe and Osakabe, 2014). در مطالعات متعدد یکی از پاسخ‌های اولیه به تنش آبی بسته شدن روزنه‌ها و به موازات آن کاهش هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز گزارش شده است (Klamkowski and Treder, 2006). گیاهان تحت تنش، توسط تنظیم روزنه‌ای از اتلاف زیاد آب از طریق ترقق جلوگیری می‌کنند (Chinnusamy et al., 2004). با کاهش رطوبت خاک و اعمال تنش خشکی ریشه گیاه شروع به تولید و ارسال هورمون آبسزیک اسید (ABA) به برگ می‌نماید. در واکنش به پیام دریافتی، ابتدا هدایت روزنه‌ای کاهش می‌یابد، سپس محتوای نسبی آب و در نهایت فتوسنتز شروع به کاهش می‌کند (Ullah et al., 2018). از آنجایی که فتوسنتز فرآیندی حیاتی است که بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر می‌گذارد، فهم چگونگی اثر سطوح مختلف تنش آبی بر فتوسنتز ضروری است (Nadal and Flexas, 2019). مکانیزم فتوسنتز در کلروپلاست عمدتاً پیچیده است. تنش خشکی به علت

عوامل محیطی زیادی بر رشد، عملکرد و کیفیت گیاه تأثیر می‌گذارد که تنش خشکی بارزترین آن‌ها است. تنش خشکی بر اغلب جنبه‌های فیزیولوژی گیاهان مختلف مانند محتوای کلروفیل، پارامترهای فتوسنتزی، زیست‌توده و عملکرد تأثیر منفی می‌گذارد (Tawfik and El-Mouhamady, 2019). کمبود آب نه تنها یک عامل اصلی مؤثر بر رشد محصول است، بلکه توسعه کشاورزی و اقتصادی را محدود می‌کند (Li et al., 2019). بنابراین، یکی از چالش‌های عمده فیزیولوژی گیاهی، بهبود عملکرد محصولات زراعی

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۳- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

\* نویسنده مسئول: (Email: H.alizadeh@ilam.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.4.2.2

تأثیر در بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش دسترسی به CO<sub>2</sub> در مزوفیل باعث کاهش فتوسنتز گیاه می‌شود (Daryanto et al., 2017). به‌طور کلی، کاهش فتوسنتز گیاهی ناشی از خشکی عمدتاً ناشی از محدودیت‌های روزنه‌ای و محدودیت‌های غیر روزنه‌ای است (Zhang et al., 2010). تحت تنش خشکی ملایم و متوسط، پتانسیل آب برگ و درجه بازشدگی روزنه کاهش می‌یابد که منجر به افزایش مقاومت روزنه می‌شود (Nadal and Flexas, 2019). بنابراین، CO<sub>2</sub> ورودی به روزنه کاهش یافته و منجر به کاهش فتوسنتز افزایش می‌شود (Cai et al., 2015). در این مرحله، عوامل روزنه‌ای عامل اصلی کاهش فتوسنتز هستند. در شرایط تنش خشکی شدید، باز شدن روزنه‌های گیاه به کاهش ادامه داده و حتی ممکن است بسته شوند و ورود CO<sub>2</sub> به برگ‌ها کاملاً مسدود شود. در این شرایط سرعت اکسیداسیون گیاه و تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن فعال (ROS) افزایش می‌یابد که باعث تغییر در ساختار کلروپلاست و آسیب به سیستم‌های غشایی گیاه می‌شود (Grassi and Magnani, 2005). در این حال، پراکسیداسیون لیپیدی غشاء تولید رادیکال‌های آزاد سوپراکسید را تشدید کرده و منجر به تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود؛ که در نتیجه آن سیستم انتقال الکترون فتوسنتزی از بین رفته و عملکرد فیزیولوژیکی اندام‌های فتوسنتزی از بین می‌رود (Signarbieux and Feller, 2011). در این مرحله کاهش فتوسنتز ناشی از عوامل غیرروزنه‌ای می‌باشد. در شرایط تنش آبی ملایم به دلیل کاهش بیشتر هدایت روزنه‌ای نسبت به هدایت مزوفیلی کارایی مصرف ذاتی آب (WUEi) افزایش پیدا می‌کند (Iqbal et al., 2021). اثر تنش خشکی بر غلظت CO<sub>2</sub> زیر روزنه‌ای، سرعت فتوسنتز، کارایی کربوکسیلاسیون و کارایی مصرف آب در بسیاری از گیاهان از جمله کلزا (Kausar et al., 2006)، پنبه (Mssacci et al., 2008) و نخود (Rahbarian et al., 2011) گزارش شده است. از طرف دیگر شکاف بین عرضه و تقاضای آب به دلیل محدود بودن منابع آب قابل عرضه و رشد روزافزون تقاضا برای آب در بخش‌های مختلف مصرف، لزوم مدیریت تقاضا از طریق راهکارهای مختلف را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. یکی راهکارهای مهم مدیریت تقاضای آب در بخش کشاورزی اعمال کم‌آبیاری<sup>۱</sup> (DI) به گونه‌ای است که با کاهش حجم قابل توجه آب عملکرد به طور قابل توجهی کاهش پیدا نکند (Ghaffar et al., 2020). نقش کم‌آبیاری در افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف آب در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع آب گزارش شده است (Sidhu et al., 2021). آبیاری بخشی ناحیه ریشه (PRD)<sup>۲</sup> یکی از رویکردهای مؤثر کم‌آبیاری است که نقش عمده‌ای در کاهش اثرات مضر تنش خشکی دارد (Iqbal et

al., 2021). در روش PRD نیمی از منطقه ریشه آبیاری می‌شود و نیمه دیگر خشک باقی می‌ماند سپس قسمتی از ریشه که آبیاری شده خشک نگه‌داشته و قسمت خشک قبلی آبیاری می‌شود. در روش PRD بخشی از ریشه که تحت تنش واقع شده است، ریشه‌های نابجا تولید نموده و با خشک و تر نمودن متناوب، سیستم ریشه‌ای خود را توسعه می‌بخشد، لذا گیاهان در روش PRD می‌توانند سیستم ریشه‌ای متفاوتی در مقایسه با گیاهانی که تحت کم‌آبیاری تنظیم شده قرار دارند، داشته باشند (Sepaskhah and Ahmadi, 2010). ریشه‌ها با تولید تنظیم کننده‌های رشد مانند سیتوکینین‌ها و اسید آسبزیک (ABA) بر بسیاری از عملکردهای فیزیولوژیکی گیاه تأثیر می‌گذارند (Iqbal et al., 2019). در خاک خشک، ریشه‌ها ABA بیشتری نسبت به شرایط عادی تولید می‌کنند و به عنوان یک پیام شیمیایی ضد تنش از ریشه به سمت اندام هوایی منتقل شده و تبادل روزنه‌ای را محدود می‌کند (Sepaskhah and Ahmadi, 2010). هنگامی که روش آبیاری PRD روی یک محصول اعمال می‌شود، ریشه‌ها در سمت بدون آبیاری باعث ترشح ABA می‌شوند، در حالی که ریشه‌های سمت آبیاری شده به طور همزمان با تامین آب، از کمبود آب گیاه جلوگیری کرده و وضعیت آب در شاخساره‌های گیاه را حفظ می‌کنند (Iqbal et al., 2019). روش آبیاری PRD باعث بسته شدن نسبی روزنه‌ها شده و خروج آب را بیش از انتشار CO<sub>2</sub> محدود می‌کند که باعث کاهش تعرق بدون تاثیر بر فتوسنتز گیاه می‌گردد و در نتیجه باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاه می‌شود (Ullah et al., 2018). افزایش کارایی مصرف آب و عملکرد محصول در روش آبیاری PRD نسبت به روش DI در محصولات مختلف مانند گندم (Ahmad et al., 2020)، پنبه (Iqbal et al., 2019) و سیب‌زمینی (Yan et al., 2012) گزارش شده است. با این وجود برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که بین عملکرد و بهره‌وری آب دو روش PRD و DI تفاوت معنی‌داری وجود ندارد (Wakrim et al., 2005). هر چند مطالعات زیادی در زمینه اثر PRD بر عملکرد و اجزای عملکرد محصولات زراعی و باغی انجام شده است. لیکن بررسی دلایل فیزیولوژیکی اثرات PRD بر خصوصیات عملکردی گیاه (به ویژه گیاه ماش) هنوز به طور دقیق مشخص نشده است. با توجه به مطالب گفته شده هدف از انجام این آزمایش بررسی اثر بررسی اثر کم‌آبیاری (DI) و آبیاری بخشی ناحیه ریشه (PRD) بر بهره‌وری آب و خصوصیات فتوسنتزی گیاه ماش می‌باشد. ماش یک لگوم دانه‌ریز، تابستانه و با طول رشد کوتاه می‌باشد که از عمده‌ترین منابع پروتئینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (شکوه‌فر و ابوفتیله‌نژاد، ۱۳۹۳).

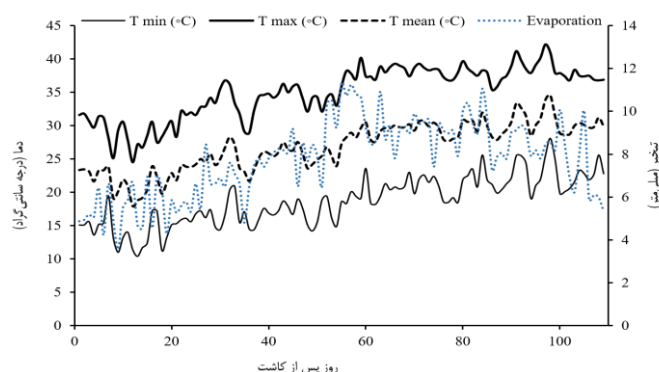
1 - Deficit Irrigation

2- Partial root zone drying

## مواد و روش‌ها

رشد آبیاری از یک جویچه) و آبیاری PRD متغیر (آبیاری در هر نوبت از یک جویچه به صورت متناوب) بود. آب و هوای منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه معتدل و نیمه مرطوب می‌باشد. در طول فصل رشد مجموع تبخیر و تعرق پتانسیل (۷۸۰ میلی‌متر)، میانگین دمای حداقل و حداکثر در طول دوره رشد، به ترتیب ۱۷/۷ و ۳۴/۱ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱). قبل از پیاده سازی نقشه طرح، نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتری بصورت مرکب انجام شده و به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد (جدول ۱).

به منظور بررسی اثر کم آبیاری و آبیاری بخشی ناحیه ریشه بر بهره‌وری آب و پارامترهای فتوسنتزی گیاه ماش آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۷ دقیقه، ارتفاع از سطح دریا ۱۱۷۴ متر انجام گردید. این آزمایش در قالب کرت خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار و ۹ تیمار انجام گرفت. تیمارهای اصلی شامل سه سطح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه و تیمارهای فرعی شامل سه روش آبیاری معمولی (آبیاری در هردو جویچه)، آبیاری PRD ثابت (تمام فصل



شکل ۱- دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای متوسط و میزان تبخیر در طول دوره رشد ماش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

بافت خاک	اسیدیته خاک	هدایت الکتریکی (ds.m <sup>-1</sup> )	ماده آلی (%)	نیتروژن کل (%)	پتاسیم (mg.kg <sup>-1</sup> )	فسفر (mg.kg <sup>-1</sup> )
لومی رسی شنی	۷/۲۵	۲/۵۶	۱/۱	۰/۰۱۷	۳۹۳	۱۰



شکل ۲- نمایی از طرح آزمایشی در مرحله رشد رویشی گیاه

ردیف‌ها و بوته های روی ردیف به ترتیب ۵۰ و ۱۰ سانتیمتر) بود (شکل ۲).

آبیاری مزرعه بصورت جویچه‌ای انجام شد و میزان آب مصرفی توسط کنتور اندازه‌گیری شد. تا زمان استقرار کامل گیاهان، همه

آماده‌سازی زمین شامل شخم با گاوآهن نیمه برگرداندار و عملیات تکمیلی تهیه زمین به وسیله دیسک و فاروئر بود. کاشت بذور در تاریخ ۱۰ خرداد در کرت‌های به ابعاد ۲ × ۲ متر مربع بصورت ردیفی انجام گرفت. کشت ماش از رقم پرتو با تراکم ۲۰ بوته در متر مربع (فاصله

$$V = (\theta_{FC} - \theta_W) \times \rho_b \times D_r \times A \quad (1)$$

در این رابطه V: حجم آب ورودی بر حسب مترمکعب، FC: درصد رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه،  $\theta_W$ : درصد رطوبت وزنی قبل از آبیاری، Pb: وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی مترمکعب، D root: عمق توسعه ریشه بر حسب متر و A: مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع است. در جدول ۲ حجم آب مصرفی هر یک از تیمارها بر حسب مترمکعب در هکتار طی فصل رشد گیاه و در جدول ۳ کیفیت آب آبیاری ارائه شده است.

جدول ۲- حجم آب مصرفی هر یک از تیمارها طی فصل رشد (مترمکعب در هکتار)

سطح آبیاری			
الگوی کشت	۵۰ درصد نیاز آبی	۷۵ درصد نیاز آبی	۱۰۰ درصد نیاز آبی
روش آبیاری معمولی	۲۴۴۷	۳۴۶۵	۴۴۸۰
روش PRD ثابت	۲۴۴۷	۳۴۶۵	۴۴۸۰
روش PRD متغیر	۲۴۴۷	۳۴۶۵	۴۴۸۰

جدول ۳- کیفیت آب آبیاری مورد استفاده

کلاس کیفی آب	SAR	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	pH	EC (dS/m)
meq/l										
C2-S1	۵/۳۱	۲۲/۵	۷/۶	۰	۷/۵	۹/۲	۰/۱۱	۱۵/۳۶	۷/۶۷	۰/۶

$$WUE_i = \frac{A_n}{T} \quad (2)$$

$$WP = \frac{Y}{WU} \quad (3)$$

که در آن An سرعت فتوسنتز ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) و Ci غلظت دی اکسیدکربن زیرروانه ای ( $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )، عملکرد محصول (Kg/ha)، T سرعت تعرق ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) و WU مقدار آب مصرفی ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) می باشد. تجزیه آماری داده های حاصل از آزمایش توسط نرم افزار (Minitab (V.16 انجام گرفت. مقایسه میانگین ها به روش توکی در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت. تجزیه رگرسیون گام به گام برای بررسی صفات موثر بر عملکرد و بهره وری آب از نرم افزار SPSS استفاده شد.

## نتایج و بحث

### عملکرد و خصوصیات فتوسنتزی

براساس تجزیه واریانس داده ها، اثر تنش خشکی و اثر متقابل تنش خشکی در روش آبیاری بر همه صفات از جمله عملکرد دانه، عملکرد زیستی، بهره وری آب، سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، دمای برگ، غلظت دی اکسیدکربن زیر روزنه معنی دار بود. اثر روش آبیاری بر عملکرد دانه، عملکرد زیستی، و سرعت فتوسنتز معنی دار و بر سایر صفات معنی دار نبود (جدول ۴).

کرت ها به میزان یکسان آبیاری شدند و پس از آن اعمال سطوح مختلف آبیاری آغاز شد. در هر مرحله از آبیاری به منظور تعیین میزان آب مصرفی، پیش از آبیاری از عمق ۳۰ سانتی متر نسبت به نمونه گیری مرکب از خاک اقدام شد. سپس نمونه های خاک در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و حجم آب آبیاری برای سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی هر یک از تیمارها از رابطه (۱) محاسبه شد. برای سایر سطوح حجم آب آبیاری از حاصل ضرب ضریب تنش آبی در رابطه (۱) محاسبه شد.

وچین مزرعه چندین بار در طول دوره رشد گیاه به صورت دستی انجام شد. به منظور حذف اثر حاشیه در فرآیند نمونه برداری، دو ردیف کناری و همچنین ۰/۵ متر ابتدا و انتهای ردیف های کشت حذف و از بوته های ردیف های وسط هر کرت ۵ برگ جوان و کاملاً رشد یافته انتخاب، و برای اندازه گیری خصوصیات فیزیولوژیکی بلافاصله به آزمایشگاه منتقل گردید. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک گیاه ماش صفات ارتفاع، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن هزاردانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت اندازه گیری شد. به منظور اندازه گیری صفات عملکرد و اجزاء عملکرد با حذف دو ردیف کناری و ۰/۵ متر بالا و پایین ردیف ها، ۵ بوته از ردیف های وسط انتخاب و صفات مد نظر اندازه گیری شد. تعداد جهت اندازه گیری سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، دمای برگ و غلظت دی اکسیدکربن زیرروانه ای از دستگاه فتوسنتز متر مدل GFS3000 ساخت کشور آلمان استفاده شد. در مرحله گلدهی با رعایت اثر حاشیه یک بوته از هر کرت انتخاب، قسمتی از برگ میانی داخل قسمت اتاقت دستگاه قرار داده شد. کارایی کربوکسیلاسیون (CE) یا هدایت مزوفیلی از رابطه (۱)، کارایی مصرف آب فتوسنتزی یا کارایی آب ذاتی (WUEi) از رابطه (۲) و بهره وری آب (WP) بر حسب ( $\text{Kg/m}^3$ ) از رابطه (۳) محاسبه شد (Quanqi et al., 2012).

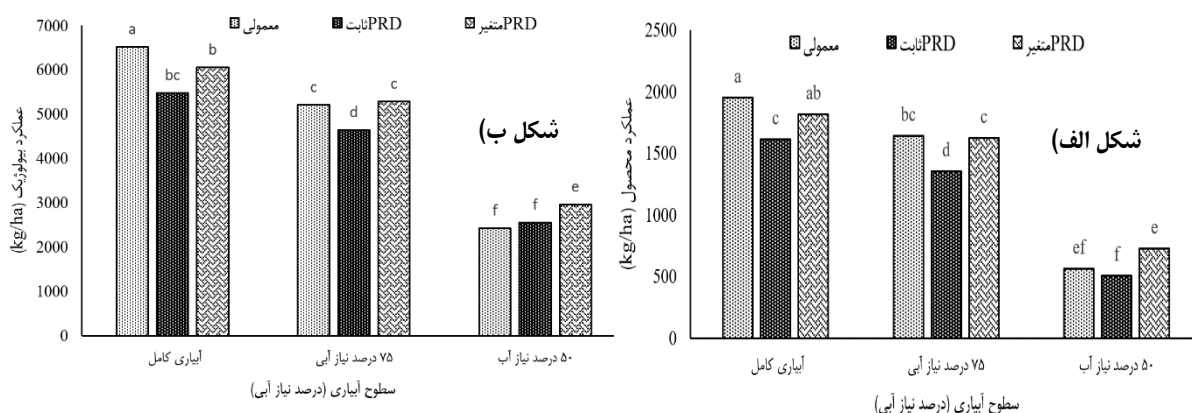
$$CE = \frac{A_n}{C_i} \quad (1)$$

جدول ۴- جدول تجزیه واریانس عملکرد و خصوصیات فتوسنتزی گیاه ماش

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد دانه	عملکرد زیستی	سرعت فتوسنتز	سرعت تعرق	دمای برگ	غلظت CO <sub>2</sub> زیر روزنه
تکرار	۲	۲۴۴۹ <sup>ns</sup>	۶۶۱۰۳ <sup>ns</sup>	۰/۲۳ <sup>ns</sup>	۰/۴۱ <sup>**</sup>	۰/۰۲ <sup>ns</sup>	۱۲۴۴/۱*
تنش آبی	۲	۷۱۷۴۴۴ <sup>**</sup>	۶۰۶۶۷۰۷۶ <sup>**</sup>	۴۲/۶ <sup>**</sup>	۱۲/۹۴ <sup>**</sup>	۲۹/۵۳ <sup>**</sup>	۲۶۰۳۰ <sup>**</sup>
خطای آزمایشی a	۴	۳۳۰۳۹	۵۵۷۰۱۷	۰/۶۴	۰/۲۲	۰/۸۱	۲۴۰/۰
روش آبیاری	۲	۳۱۷۱۷۹ <sup>**</sup>	۲۷۲۷۱۳*	۱/۵۲*	۰/۱۲ <sup>ns</sup>	۱/۷۳ <sup>ns</sup>	۵۵۹/۳ <sup>ns</sup>
تنش × روش آبیاری	۴	۹۴۳۹۷ <sup>**</sup>	۶۸۰۲۳۶*	۱/۰۵*	۰/۲۱*	۱/۹۳*	۵۷۹/۳*
خطای آزمایشی b	۱۲	۹۴۳۹۷	۳۹۷۷۳۳	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۴۶	۱۸۵/۶
ضریب تغییرات	-	۴/۷۰	۳/۹۳	۲۴/۲۷	۲۰/۵۲	۴/۷۴	۱۱/۰۲

در شکل ۳ مقایسه میانگین اثر متقابل تنش آبی و روش آبیاری بر عملکرد دانه و زیستی بر اساس آزمون توکی ارائه شده است. بر این اساس، بیشترین عملکرد دانه (۱۹۵۴ کیلوگرم در هکتار) و زیستی (۶۵۱۹ کیلوگرم در هکتار) در شرایط بدون تنش و روش آبیاری معمولی و کمترین عملکرد دانه (۵۰۲ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد زیستی (۲۴۲۶/۴۴ کیلوگرم در هکتار) در شرایط تنش شدید آبی و به ترتیب در روش آبیاری PRD ثابت و آبیاری معمولی به دست آمد. در شرایط بدون تنش خشکی، بیشترین میزان عملکرد دانه و عملکرد زیستی در روش آبیاری معمولی حاصل شد. در شرایط تنش آبی ملایم، کمترین میزان عملکرد دانه و عملکرد زیستی در روش آبیاری PRD ثابت حاصل شد و بین عملکرد دانه و عملکرد زیستی دو روش آبیاری معمولی و PRD متغیر اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در شرایط تنش خشکی شدید، بیشترین میزان عملکرد در روش PRD متغیر حاصل شد که نشان دهنده اثر مثبت این روش در شرایط تنش بر عملکرد دانه و زیستی ماش بود. در بررسی اثر تنش خشکی بر عملکرد دانه و زیستی ماش گزارش گردیده است که تنش خشکی تا ۳۵ درصد عملکرد دانه و تا ۶۰ درصد عملکرد زیستی در ماش را کاهش داد (Heidari et al., 2019). تر و خشک شدن متناوب

سیستم ریشه گیاه، برای ترشح مداوم ABA از ریشه به اندام هوایی ضروری است. از آنجایی که در شرایط خاک خشک، ریشه نمی‌تواند برای مدت طولانی به تولید آبسزیک اسید ادامه دهد، بنابراین تر و خشک شدن متناوب خاک می‌تواند به ریشه برای تولید این هورمون کمک کند. خشکی طولانی مدت ریزوسفر، باعث تغییرات ساختاری ریشه مثل چوب‌پنبه‌ای شدن اپیدرم، متلاشی شدن کورتکس (پوست) و از دست دادن طراوت ریشه‌های فرعی می‌شود (Slamini et al., 2022). در نتیجه توانایی ریشه‌ها در درک خشکی خاک را کاهش می‌دهد. همچنین روند خشک و تر شدن متناوب خاک، می‌تواند تولید و توزیع ریشه‌های ثانویه را گسترش دهد و هدایت هیدرولیکی ریشه را افزایش دهد (Zhenchang et al., 2016). ریشه‌های ثانویه، جذب مواد مغذی از خاک را افزایش می‌دهند (Kang et al., 2004). با توجه به مطالب عنوان شده، بیشتر بودن عملکرد در روش آبیاری PRD متغیر قابل توجیه است. در تحقیقات مختلفی افزایش عملکرد دانه و عملکرد زیستی در گیاهان زراعی در شرایط استفاده از روش PRD گزارش شده است (Wang et al., 2021; dos-santos et al., 2015).



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل روش آبیاری و تنش آبی بر عملکرد (شکل الف) و عملکرد بیولوژیک ماش (شکل ب)

در شکل ۴ مقایسه میانگین اثر متقابل روش آبیاری و تنش آبی بر سرعت تعرق (شکل ۴-الف)، سرعت فتوسنتز (شکل ۴-ب)، دمای برگ (شکل ۴-ج) و  $CO_2$  زیر روزه‌ای (شکل ۴-د) بر اساس آزمون توکی ارائه شده است. بیشترین سرعت تعرق ( $4/69$  میلی‌مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط بدون تنش و روش آبیاری معمولی مشاهده شد. کمترین میزان تعرق ( $1/99$  میلی‌مول  $H_2O$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط تنش شدید و روش آبیاری معمولی به دست آمد. با افزایش تنش آبی، سرعت تعرق در هر سه روش آبیاری به طور معنی‌داری کاهش پیدا می‌کند. لیکن بین روش‌های مختلف تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. اولین پاسخ گیاهان به تنش خشکی، بستن روزه‌ها می‌باشد. که این امر سبب کاهش هدایت روزه‌ای و در نتیجه کاهش میزان تعرق می‌گردد که از کاهش زیاد آب برگ جلوگیری می‌کند (حسینی مقدم و همکاران، ۱۳۹۴). بنابراین کاهش میزان تعرق در شرایط تنش خشکی می‌تواند به عنوان مکانیسمی برای حفظ آب برگ و جلوگیری از هدررفتن آن بیان شود (Daryanto et al., 2017). کاهش میزان تعرق در تیمارهای تحت تنش به علت بسته شدن روزه‌ها و کاهش هدایت روزه‌ای است (Bastam et al., 2013) که علاوه بر تولید آکسیژن اسید در ریشه و ارسال آن به برگ‌ها، در اثر کاهش پتانسیل آماسی در برگ نیز به وجود می‌آید (Yamori et al., 2014). بررسی‌های انجام شده روی تبادلات گازی لوبیا (Papazoglou et al., 2020)، گیاهان جو دوسر (Zhang et al., 2022) و پنبه (مهرآبادی و همکاران، ۱۳۹۶) تحت تنش رطوبتی ثابت کرده است که تنش رطوبتی باعث کاهش هدایت روزه‌ای و سرعت تعرق می‌شود که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. بیشترین سرعت فتوسنتز ( $10/71$  میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط بدون تنش و روش آبیاری معمولی و کمترین میزان آن ( $5/09$  میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط تنش شدید و روش آبیاری معمولی مشاهده شد (شکل ۴-ب). بالاترین سرعت فتوسنتز در تنش ملایم و شدید به ترتیب با  $8/79$  و  $6/22$  میکرومول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه در PRD متغییر حاصل شد. بنابراین در شرایط تنش آبی روش آبیاری PRD متغیر بر روش آبیاری معمولی برتری دارد. بنابراین تنش خشکی به متابولیسم فیزیولوژیکی و فتوسنتز گیاهان آسیب می‌رساند. کاهش سرعت فتوسنتز تحت تنش آبی در محصولات گندم (Zhao et al., 2016 و Wang et al., 2020)، جو دوسر (Zhang et al., 2022) و پنبه (مهرآبادی و همکاران، ۱۳۹۶) نیز گزارش شده است. بیشترین دمای برگ ( $38/79$  درجه سانتیگراد) در شرایط تنش شدید و روش آبیاری معمولی و کمترین میزان آن ( $33/47$  درجه سانتیگراد) در شرایط بدون تنش و روش آبیاری معمولی حاصل شد (شکل ۴-ج). بسته شدن روزه‌ها

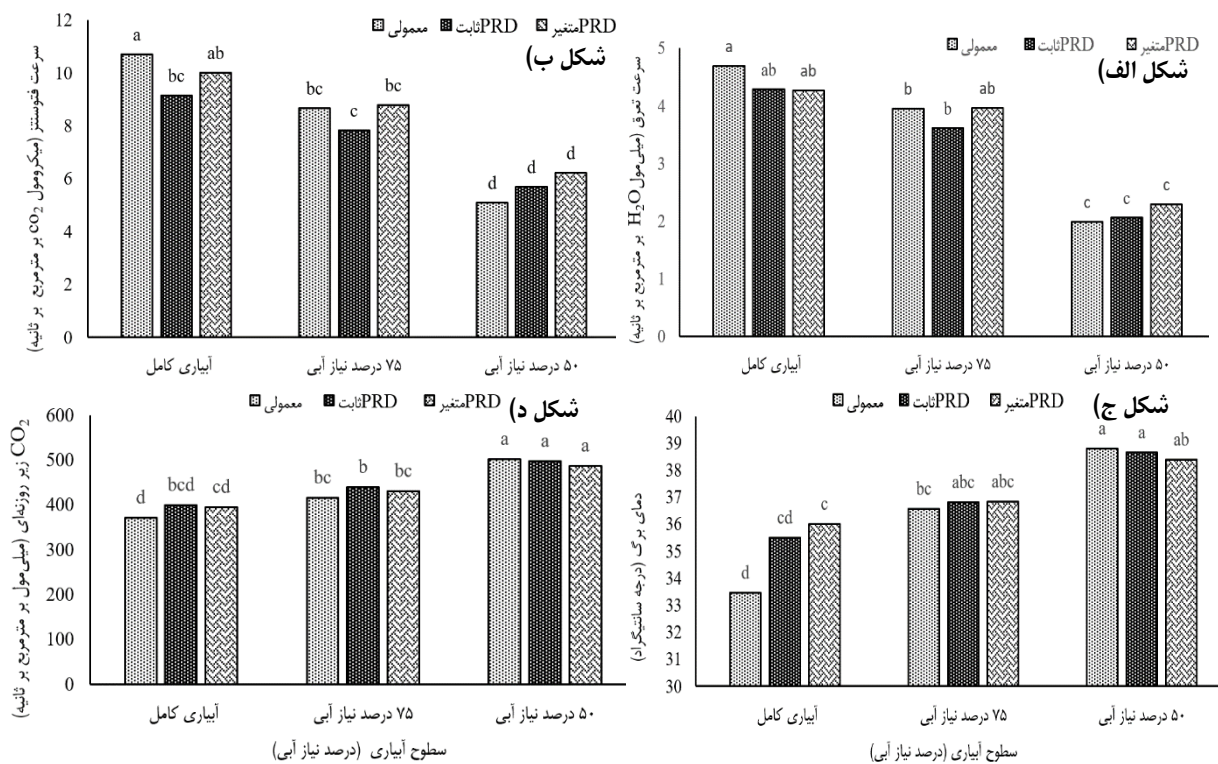
طی تنش خشکی اگرچه به‌عنوان یک مکانیسم مقاومت در برابر تنش خشکی عمل می‌کند اما سبب افزایش دمای برگ می‌گردد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۳). تعرق روزه‌ای به وسیله تنظیم روزه‌ها تحت شرایط تنش خشکی، نقش اساسی در تنظیم دمای برگ دارد. بدین صورت که با بسته شدن روزه‌ها سبب کاهش تعرق و مانع از خنک شدن گیاه شده و همین مسئله سبب افزایش دمای برگ می‌شود. در گیاهان جو دوسر (Zhang et al., 2022) و پنبه (مهرآبادی و همکاران، ۱۳۹۶) نیز افزایش دمای برگ بر اثر تنش خشکی گزارش شده است. بیشترین غلظت دی‌اکسیدکربن زیرروزه‌ای ( $50/132$  میلی‌مول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط تنش شدید و روش آبیاری معمولی و کمترین میزان آن ( $37/52$  میلی‌مول  $CO_2$  بر مترمربع بر ثانیه) در شرایط بدون تنش و روش آبیاری معمولی به دست آمد (شکل ۴-د). تحت شرایط تنش خشکی، به دلیل عدم توانایی کلروپلاست سلول‌های مزوفیل در فرآوری دی‌اکسیدکربن وارد شده به برگ، غلظت دی‌اکسیدکربن زیرروزه‌ای افزایش می‌یابد (سی‌وسه‌مرده و همکاران، ۱۳۹۱). اثر تنش آبی شدید و ملایم بر غلظت  $CO_2$  زیر روزه‌ای در جو دوسر (Zhang et al., 2022) و گندم (Wang et al., 2016 و Zhao et al., 2020) به ترتیب معنی‌دار و غیر معنی‌دار گزارش شده است که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

#### بهره‌وری آب

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش آبی بر بهره‌وری آب، کارایی کربوکسیلاسیون و کارایی مصرف آب فتوسنتزی معنی‌دار بود. اثر روش آبیاری بر بهره‌وری آب، کارایی کربوکسیلاسیون معنی‌دار و بر کارایی مصرف آب فتوسنتزی معنی‌دار نبود. همچنین اثر متقابل تنش آبی در روش آبیاری بر بهره‌وری آب و کارایی کربوکسیلاسیون معنی‌دار بود (جدول ۵).

نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که با کاهش مقدار آب مصرفی کارایی مصرف آب فتوسنتزی کاهش پیدا می‌کند (شکل ۵-الف). روش آبیاری تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب فتوسنتزی نداشت. دلیل کمتر بودن راندمان مصرف آب فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل این است که گیاه در شرایط آبیاری کامل، فتوسنتز بالاتری دارد که موجب کاهش راندمان مصرف آب فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی می‌شود. مشابه مطالعه حاضر، کاهش کارایی مصرف آب فتوسنتزی در شرایط تنش آبی در محصولات کدو تنبل (Mashilo et al., 2017)، گندم دروم و جو (Katerji et al., 2009) گزارش شده است.





شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل روش آبیاری و تنش آبی بر سرعت تعرق (الف) و فتوسنتز (ب)، دمای برگ (ج) و C<sub>02</sub> زیر روزنه‌ای (د)

جدول ۵- جدول تجزیه واریانس بهره‌وری آب و کارایی مصرف کربوکسیلاسیون

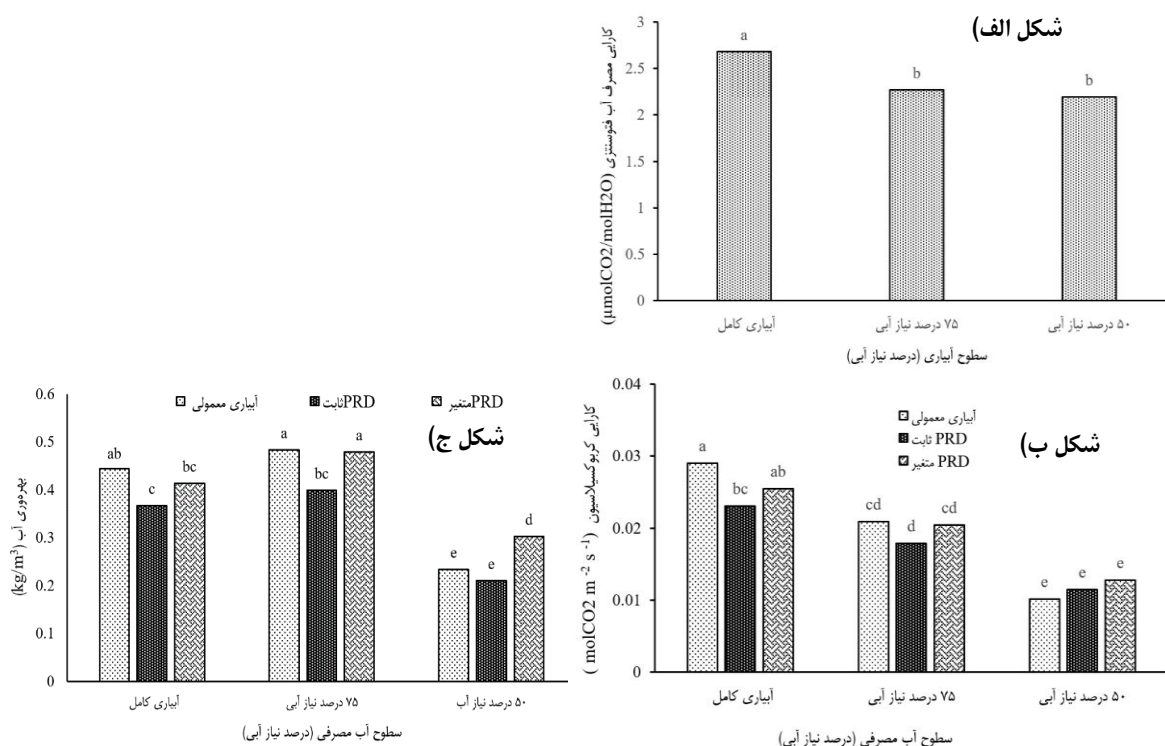
کارایی مصرف آب فتوسنتزی	کارایی کربوکسیلاسیون	بهره‌وری آب	درجه آزادی	منابع تغییرات
۰/۲۶	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰ns	۲	تکرار
۱/۲۴*	۰/۰۰۰۹۴*	۰/۲۰۸**	۲	تنش آبی
۰/۲۷	۰/۰۰۰۰۴*	۰/۰۰۰۳	۴	خطای آزمایشی a
۰/۰۴ns	۰/۰۰۰۰۳**	۰/۰۲۸**	۲	روش آبیاری
۰/۱۲ns	۰/۰۰۰۰۵**	۰/۰۰۰۹**	۴	تنش × روش آبیاری
۰/۵۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۱۲	خطای آزمایشی b
۸/۶۰	۷/۰۵	۴/۷۰	-	ضریب تغییرات

کارایی مصرف کربوکسیلاسیون روش آبیاری معمولی و PRD متغیر تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، لیکن کارایی مصرف کربوکسیلاسیون روش آبیاری معمولی به طور معنی‌داری از روش PRD ثابت بیشتر بود. در تنش آبی شدید کارایی کربوکسیلاسیون روش آبیاری PRD متغیر از دو روش دیگر بیشتر بود ولی این تفاوت معنی‌دار نبود (شکل ۵-ب). افزایش دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای در شرایط تنش خشکی بیان کننده عدم توانایی کلروپلاست سلول‌های مزوفیل در فراوری دی اکسید کربن وارد شده به برگ با وجود عبور آن از مقاومت روزنه-ای می‌باشد که بیانگر کاهش هدایت مزوفیلی و کارایی کربوکسیلاسیون در شرایط تنش است (سی و سه مرده و همکاران،

در تعارض با مطالعه حاضر، کارایی مصرف آب فتوسنتزی دو ژنوتیپ گندم زمستانه در تنش‌های ملایم منجر به افزایش کارایی مصرف آب فتوسنتزی شده است (Liu et al., 2016). کاهش کارایی مصرف آب در شرایط تنش آبی ناشی از کاهش بیشتر فتوسنتز در مقایسه با تنفس گیاه می‌باشد (Wang et al., 2018). همچنین تنش آبی شدید باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای و مزوفیلی شده و از این طریق ورود CO<sub>2</sub> به درون گیاه کاهش پیدا کرده و به تبع آن فتوسنتز و زیست توده گیاه کاهش می‌یابد. با کاهش مقدار آب مصرفی (افزایش تنش آبی) کارایی مصرف کربوکسیلاسیون به طور معنی‌داری کاهش پیدا می‌کند. در آبیاری کامل و تنش آبی ملایم بین

ثابت بهره‌وری آب به طور معنی‌داری کمتر از روش PRD متغیر بود (شکل ۵-ج). نتایج نشان داد که در تنش ملایم بهره‌وری آب بیشتر از آبیاری کامل است و در تنش شدید بهره‌وری آب به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Ye et al., 2013). دلیل این مسئله را می‌توان در کاهش ناچیز عملکرد محصول در مقابل کاهش قابل ملاحظه آب مصرفی توصیف نمود. در مطالعات قبلی افزایش بهره‌وری آب در تنش ملایم و کاهش بهره‌وری در تنش شدید تایید شده است (Zhao et al., 2020; Oweis et al., 2000).

در همه روش‌های آبیاری بیشترین مقدار بهره‌وری آب در سطح آبی ۷۵ درصد حاصل شد. بیشترین مقدار بهره‌وری آب ماش به مقدار ۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب در سطح آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی (تنش ملایم) و روش PRD متغیر اتفاق افتاد. در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی بین مقدار بهره‌وری آب روش آبیاری معمولی و PRD متغیر تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. در تنش‌های آبی شدید (۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی) بهره‌وری آب در روش PRD متغیر به طور معنی‌دار از دو روش دیگر برتر بود. در همه سطوح آبیاری روش آبیاری PRD



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر تنش آبی بر کارایی مصرف آب فتوسنتزی (الف) و اثر متقابل تنش آبی در روش آبیاری کارایی کربوکسیلاسیون (ب) و بهره‌وری آب (ج)

غیرمستقیم فتوسنتز از طریق سرعت تعرق و بیشترین اثر غیرمستقیم سرعت تعرق از طریق سرعت فتوسنتز حاصل شد. اثر غیرمستقیم سرعت تعرق و فتوسنتز از طریق دمای برگ و غلظت CO<sub>2</sub> بر عملکرد دانه مثبت و بر بهره‌وری آب منفی بود. دمای برگ اثر مستقیم معنی‌داری بر عملکرد محصول نداشت. لیکن اثر غیرمستقیم دمای برگ از طریق اثر سرعت تعرق و فتوسنتز بر دمای برگ بر روی عملکرد دانه منفی و معنی‌دار بود. اثر مستقیم غلظت CO<sub>2</sub> بر عملکرد دانه و بهره‌وری آب زیاد نبود. لیکن اثر غیرمستقیم غلظت CO<sub>2</sub> اهم‌بستگی منفی سرعت تعرق و فتوسنتز بر غلظت CO<sub>2</sub> نسبتاً زیاد بود.

### تجزیه علیت و آنالیز رگرسیون

نتیجه آزمون همبستگی پیرسون (جدول ۶) نشان داد که بین سرعت فتوسنتز و سرعت تعرق با عملکرد دانه و بهره‌وری آب همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود دارد. همچنین بین دمای برگ و غلظت CO<sub>2</sub> زیرروزنه‌ای با عملکرد دانه و بهره‌وری آب همبستگی منفی وجود دارد. در این مطالعه از آنالیز تجزیه علیت برای بررسی اثرات مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای فتوسنتزی بر عملکرد (جدول ۷) و بهره‌وری آب (جدول ۸) استفاده شد. نتایج نشان داد سرعت تعرق و سرعت فتوسنتز بیشترین تاثیر مستقیم و مثبت را بر روی عملکرد دانه و بهره‌وری آب داشتند. همچنین بیشترین اثر



جدول ۶- همبستگی ساده بین صفات ارزیابی شده مربوط به عملکرد و بهره‌وری آب با پارامترهای فتوسنتزی

عملکرد	بهره‌وری آب	سرعت فتوسنتز	سرعت تعرق	دمای برگ	غلظت CO <sub>2</sub> زیر روزنه
بهره‌وری آب	۰/۹۱**	۱/۰			
سرعت فتوسنتز	۰/۷۹**	۱/۰			
سرعت تعرق	۰/۸۱**	۰/۹۵**	۱/۰		
دمای برگ	-۰/۸۴**	-۰/۸۷**	-۰/۸۴**	۱/۰	
غلظت CO <sub>2</sub> زیر روزنه	-۰/۹۲**	-۰/۷۶**	-۰/۹۳**	-۰/۸۵**	۱/۰

\*\* اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد می‌باشد.

جدول ۷- اثر مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای فتوسنتزی بر عملکرد دانه ماش

اثر مستقیم	اثر غیرمستقیم از طریق				همبستگی کل
	سرعت فتوسنتز	سرعت تعرق	دمای برگ	غلظت CO <sub>2</sub> زیر روزنه	
سرعت فتوسنتز	۰/۳۷۸	۰/۳۶۰	۰/۰۳۸	۰/۱۶۲	۰/۹۴**
سرعت تعرق	-۰/۳۸۱	-	۰/۰۳۷	۰/۱۶۱	۰/۹۴**
دمای برگ	-۰/۰۴۴	-۰/۳۲۰	-	-۰/۱۴۸	-۰/۸۴**
غلظت CO <sub>2</sub> زیر روزنه	-۰/۱۷۳	-۰/۳۵۴	-۰/۰۳۸	-	-۰/۹۲**

\*\* اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد می‌باشد.

جدول ۸- اثر مستقیم و غیرمستقیم پارامترهای فتوسنتزی بر بهره‌وری آب

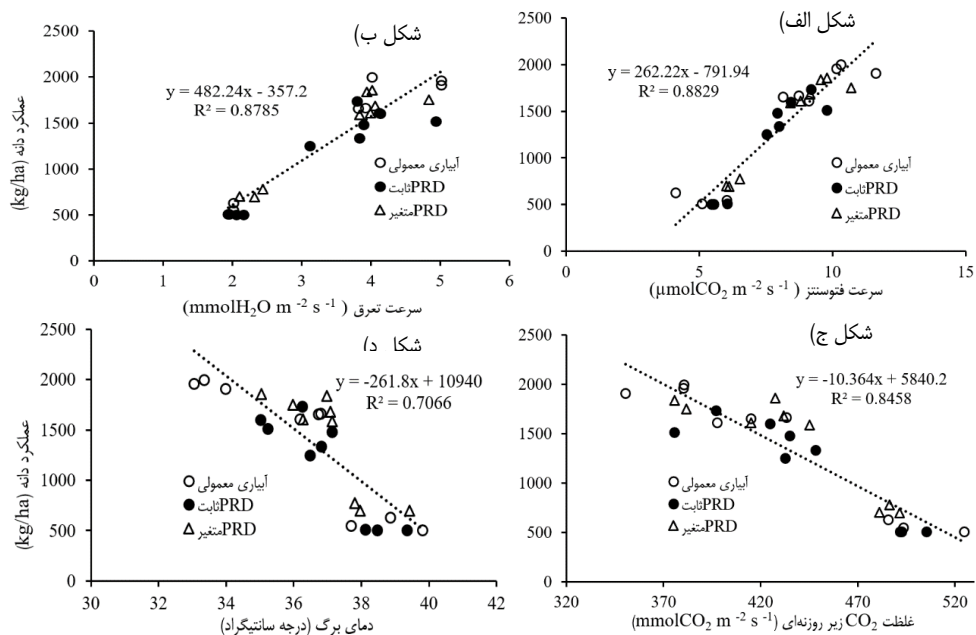
اثر مستقیم	اثر غیرمستقیم از طریق				همبستگی کل
	سرعت فتوسنتز	سرعت تعرق	دمای برگ	غلظت CO <sub>2</sub> زیر روزنه	
سرعت فتوسنتز	۰/۳۲۶	۰/۶۵۹	-۰/۱۷۶	-۰/۰۲۲	۰/۷۹**
سرعت تعرق	۰/۶۹۷	-	-۰/۱۷۰	-۰/۰۲۲	۰/۸۱**
دمای برگ	۰/۲۰۲	-۰/۲۸۳	-	۰/۰۱۲	-۰/۶۵**
غلظت CO <sub>2</sub> زیر روزنه	۰/۰۲۳	-۰/۳۰۶	۰/۱۷۳	-	-۰/۷۶**

\*\* اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد می‌باشد.

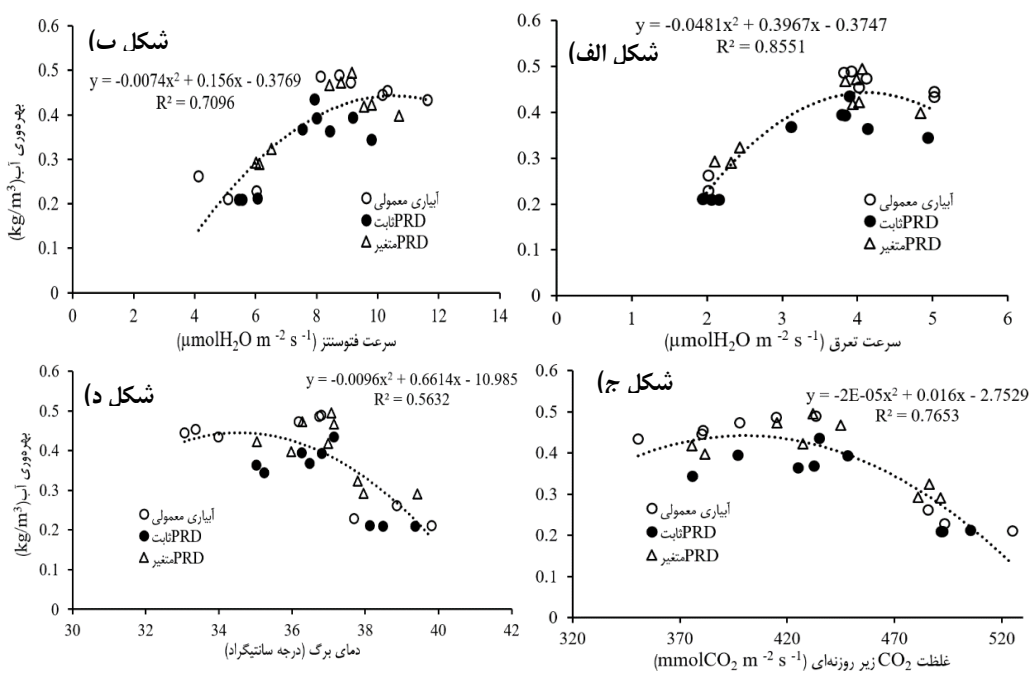
می‌یابد و این رابطه یک رابطه درجه دوم با ضریب رگرسیون منفی می‌باشد. افزایش غلظت CO<sub>2</sub> زیرروزنه‌ای بیانگر کاهش فتوسنتز و به تبع آن عملکرد محصول می‌باشد. نتایج نشان داد که رابطه بین غلظت CO<sub>2</sub> زیرروزنه‌ای و بهره‌وری آب یک رابطه درجه دوم با رگرسیون منفی می‌باشد.

در شکل ۸ رابطه بین بهره‌وری آب و مقدار آب مصرفی در سه روش آبیاری ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌وری آب در تنش ملایم آبی از آبیاری کامل و تنش آبی شدید بیشتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در تنش‌های آبی شدید، بهره‌وری آب روش آبیاری PRD از روش آبیاری معمولی بیشتر است. افزایش بهره‌وری آب در تنش‌های آبی ملایم و روش آبیاری PRD در پژوهش‌های پیشین هم تایید شده است (Zhao et al., 2020; Oweis et al., 2000).

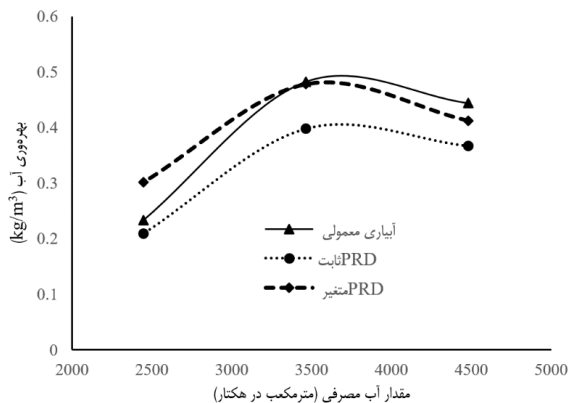
در شکل‌های ۶ و ۷ رابطه رگرسیونی بین عملکرد و بهره‌وری آب با پارامترهای فتوسنتزی ارائه شده است. نتایج نشان داد که بین عملکرد و سرعت تعرق و سرعت فتوسنتز رابطه خطی و مستقیم وجود دارد. یعنی با افزایش سرعت تعرق و فتوسنتز، عملکرد به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. رابطه دمای برگ و غلظت CO<sub>2</sub> زیرروزنه‌ای با عملکرد خطی و معکوس می‌باشد. همچنین رابطه بین بهره‌وری آب و سرعت فتوسنتز و سرعت تعرق به صورت مستقیم درجه دو می‌باشد. لازم به ذکر است که بهره‌وری آب معادل عملکرد بر حسب آب مصرفی تعریف شده است و افزایش تعرق یعنی اینکه بخش بیشتری از آب مصرفی صرف تعرق و عمل فتوسنتز شده که در نهایت منجر به افزایش صورت کسر یعنی عملکرد محصول می‌شود. افزایش دمای برگ ناشی از کاهش فتوسنتز و کاهش تعرق از سطح برگ می‌باشد. بنابراین با افزایش دمای برگ بهره‌وری آب کاهش



شکل ۶- رابطه بین صفات فتوسنتزی الف) سرعت فتوسنتز، ب) سرعت تعرق، ج) غلظت  $\text{CO}_2$  و د) دمای برگ و عملکرد دانه



شکل ۷- رابطه بین صفات فتوسنتزی الف) سرعت فتوسنتز، ب) سرعت تعرق، ج) غلظت  $\text{CO}_2$  و د) دمای برگ و بهره‌وری آب



شکل ۸- رابطه بین مقدار آب مصرفی و بهره‌وری آب

## نتیجه‌گیری کلی

تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضا برای آب در بخش‌های مختلف مصرف باعث تشدید شرایط کم‌آبی در کشور شده است. با این حال، معرفی روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب برای تولید محصولات کشاورزی حیاتی است. یکی از روش‌های نسبتاً جدید در صرفه‌جویی در مصرف آب استفاده از روش کم‌آبیاری و آبیاری بخشی ناحیه ریشه می‌باشد. در این مطالعه اثر تنش خشکی بر عملکرد دانه، بهره‌وری آب و پارامترهای فتوسنتزی گیاه ماش مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا علاوه بر آنالیز واریانس و مقایسه میانگین از تجزیه علیت و آنالیز رگرسیون برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر بهره‌وری آب و عملکرد محصول استفاده شد. نتایج نشان داد که تنش خشکی در همه روش‌های آبیاری (آبیاری معمولی، PRD متغیر و PRD ثابت) باعث کاهش سرعت فتوسنتز (Pn)، سرعت تعرق (Tr)، کارایی مصرف ذاتی آب (WUEi)، کارایی کربوکسیلاسیون، عملکرد محصول و افزایش دمای برگ و غلظت CO<sub>2</sub> بین سلولی (Ci) می‌شود. از طرف دیگر نتایج نشان داد در در تنش‌های ملایم آبی (استفاده از ۷۵ درصد نیاز آبی) اثر معنی‌داری بر عملکرد محصول نداشته و باعث افزایش بهره‌وری آب می‌شود. همچنین با انتخاب روش آبیاری مناسب می‌توان اثر تنش خشکی را تعدیل نمود. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که با استفاده از روش PRD متناوب می‌توان اثر تنش آبی را کاهش داده و بهره‌وری آب را افزایش داد. همچنین نتایج تجزیه علیت نشان داد که دو عامل تعرق و سرعت فتوسنتز بیشترین تاثیر مستقیم را بر عملکرد و بهره‌وری آب دارد. بین عملکرد و پارامترهای فتوسنتزی رابطه خطی و بین بهره‌وری آب و پارامترهای فتوسنتزی رابطه درجه دوم برقرار بود. یکی از مهمترین دلایل استفاده محدود از روش PRD عدم ترویج و پذیرش آن توسط کشاورزان می‌باشد. ایجاد مزارع ترویجی و انجام مطالعات در مقیاس بزرگ می‌تواند راه را برای کاربردی کردن این روش هموار سازد.

## منابع

- حسینی‌مقدم، ا.، اثنی‌عشری، م. و رضائی‌نژاد، ع. ۱۳۹۴. اثر تنش خشکی روی برخی از خصوصیات فیزیولوژیکی شش رقم انار تجاری ایرانی. دو فصلنامه فناوری تولیدات گیاهی. ۷ (۱): ۱-۱۱.
- حیدری، ن.، پوریوسف، م. و توکلی، ا. ۱۳۹۳. تاثیر تنش خشکی بر فتوسنتز، پارامترهای وابسته به آن و محتوای نسبی آب گیاه آنیسون (*Pimpinella anisum L.*). مجله پژوهش‌های گیاهی. ۲۷ (۵): ۸۳۹-۸۲۹.
- سی و سه مرده، ع.، خالوندی، م.، بهرام‌نژاد، ب. و روحی، ا. ۱۳۹۱. اثر تنش خشکی بر تبادلات گازی، پروتئین‌های محلول برگ و میزان کلروفیل در اکوتیپ‌های گندم سرداری. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۴۳ (۴): ۵۸۸-۵۷۳.
- شکوه‌فر، ع. و ابوفتیله نژاد، س. ۱۳۹۳. اثر تنش خشکی روی برخی صفات فیزیولوژیکی و عملکرد بیولوژیکی ارقام مختلف ماش (*Vigna radiate (L.)*) در دزفول. فصلنامه فیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۷ (۵): ۵۹-۴۹.
- مهرآبادی، ح. ر.، نظامی، ا.، کافی، م. و رضائی‌مقدم، م. ر. ۱۳۹۶. ارزیابی برخی از واکنش‌های فیزیولوژیک ارقام حساس و متحمل پنبه در شرایط تنش خشکی. پژوهش‌های پنبه ایران. ۵ (۱): ۹۱-۱۰۸.
- مهرآبادی، ح. ر.، نظامی، ا.، کافی، م. و رضائی‌مقدم، م. ر. ۱۳۹۶. ارزیابی برخی از واکنش‌های فیزیولوژیک ارقام حساس و متحمل پنبه در شرایط تنش خشکی. مجله پژوهش‌های پنبه ایران. ۵ (۱): ۹۱-۱۰۸.
- Ahmad, S., Raza, M.A.S., Saleem, M.F., Zaheer, M.S., Iqbal, R., Haider, I., Aslam, M.U., Ali, M. and Khan, I.H. 2020. Significance of partial root zone drying and mulches for water saving and weed suppression in wheat. *Journal of Animal and Plant Sciences*. 30(1):154-162.
- Bastam, N., Baninasab, B. and Ghobadi, C. 2013.

- and barley productivity in saline-drought environments. *European Journal of Agronomy*. 31(1):1-9.
- Kausar, R., Athar, H. U. and Ashraf, M. U. 2006. Chlorophyll fluorescence: a potential indicator for rapid assessment of water stress tolerance in canola (*Brassica napus* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 38(5):1501-1509.
- Klamkowski, K. and Treder, W. 2006. Morphological and physiological responses of strawberry plants to water stress. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 71 (4):159-165.
- Li, Y., Song, H., Zhou, L., Xu, Z. and Zhou, G. 2019. Vertical distributions of chlorophyll, nitrogen, and their associations with photosynthesis under drought and rewatering regimes in a maize field. *Agricultural and Forest Meteorology*. 272:40-54.
- Liu, E.K., Mei, X.R., Yan, C.R., Gong, D.Z. and Zhang, Y.Q. 2016. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. *Agricultural Water Management*. 167:75-85.
- Liu, E.K., Mei, X.R., Yan, C.R., Gong, D.Z. and Zhang, Y.Q. 2016. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. *Agricultural Water Management*. 167: 75-85.
- Mashilo, J., Odindo, A.O., Shimelis, H.A., Musenge, P., Tesfay, S.Z. and Magwaza, L.S. 2017. Drought tolerance of selected bottle gourd [*Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.] landraces assessed by leaf gas exchange and photosynthetic efficiency. *Plant physiology and biochemistry*. 120: 75-87.
- Mssacci, A., Nabiev, S. M., Pietrosanti, L., Nematov, S. K., Chernikova, T. N., Thor, K. and Leipner, J. 2008. Response of photosynthetic apparatus of cotton (*Gossypium hirsutum*) to the onset of water stress under field conditions studied by gas-exchange analysis and chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Physiology and Biochemistry*. 46:189-95.
- Nadal, M. and Flexas, J. 2019. Variation in photosynthetic characteristics with growth form in a water-limited scenario: implications for assimilation rates and water use efficiency in crops. *Agricultural Water Management*. 216: 457-472.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K. and Tran, L.S.P. 2014. Response of plants to water stress. *Frontiers in plant science*. 5:86.
- Oweis, T., Zhang, H. and Pala, M. 2000. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agronomy journal*. 92(2):231-238.
- Papazoglou, E.G., Alexopoulou, E., Papadopoulos, G.K. and Economou-Antonaka, G. 2020. Tolerance to drought and water stress resistance mechanism of castor bean. *Agronomy*. 10(10): 1580.
- Quanqi, L., Xunbo, Z., Yuhai, C. and Songlie, Y. 2012. Water consumption characteristics of winter wheat Improving salt tolerance by exogenous application of salicylic acid in seedlings of pistachio. *Plant growth regulation*. 69: 275-284.
- Cai, Y., Wang, J., Li, S., Zhang, L., Peng, L., Xie, W. and Liu, F. 2015. Photosynthetic response of an alpine plant, *Rhododendron delavayi* Franch, to water stress and recovery: the role of mesophyll conductance. *Frontiers in Plant Science*. 6: 1089.
- Chinnusamy, V., Schumaker, K. and Zhu, J. K. 2004. Molecular genetic perspectives on cross-talk and specificity in abiotic stress signaling in plants. *Journal of Experimental Botany*. 55: 225-236.
- Daryanto, S., Wang, L. and Jacinthe, P.A. 2017. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*. 179:18-33.
- dos Santos, M.R., Neves, B.R., da Silva, B.L. and Donato, S.L.R. 2015. Yield, water use efficiency and physiological characteristic of "Tommy Atkins" mango under partial rootzone drying irrigation system. *Journal of Water Resource and Protection*. 7(13):1029.
- Ghaffar, A., Habib ur Rahman, M., Ali, H.R., Haider, G., Ahmad, S., Fahad, S. and Ahmad, S. 2020. Modern concepts and techniques for better cotton production. *Cotton Production and Uses: Agronomy, Crop Protection, and Postharvest Technologies*. 589-628.
- Grassi, G. and Magnani, F. 2005. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. *Plant, Cell and Environment*. 28(7): 834-849.
- Heidari, H., Alizadeh, Y. and Fazeli, A. 2019. Effects of seed priming and foliar application of salicylic acid on some of physiological characteristic and yield on mung bean (*Vigna radiata* L.) under drought stress condition. *Journal of Plant Production Research*. 26(2):127-141.
- Iqbal, R., Habib-ur-Rahman, M., Raza, M.A.S., Waqas, M., Ikram, R.M., Ahmed, M.Z., Toleikiene, M., Ayaz, M., Mustafa, F., Ahmad, S. and Aslam, M.U. 2021. Assessing the potential of partial root zone drying and mulching for improving the productivity of cotton under arid climate. *Environmental Science and Pollution Research*. 28: 66223-66241.
- Iqbal, R., M. A. S. Raza, M. F. Saleem, I. H. Khan, S. Ahmad, M. S. Zaheer, and Haider, I. 2019. Physiological and biochemical appraisal for mulching and partial rhizosphere drying of cotton. *Journal of Arid Land*. 11 (5):785-94.
- Kang, S. and Zhang, J. 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of experimental botany*. 55(407):2437-2446.
- Katerji, N., Mastrorilli, M., Van Hoorn, J.W., Lahmer, F.Z., Hamdy, A. and Oweis, T. 2009. Durum wheat

- Assessment of droughts and wheat yield loss on the North China Plain with an aggregate drought index (ADI) approach. *Ecological Indicators* 87:107–16.
- Wang, X., Wang, L. and Shangguan, Z. 2016. Leaf gas exchange and fluorescence of two winter wheat varieties in response to drought stress and nitrogen supply. *PLoS One*. 11(11):0165733.
- Wang, Y., Liu, C., Cui, P. and Su, D. 2021. Effects of Partial Root-zone drying on alfalfa growth, yield and quality under subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 245:106608.
- Yamori, W., Hikosaka, K. and Way, D.A. 2014. Temperature response of photosynthesis in C 3, C 4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis research*. 119:101-117.
- Yan, F., Sun, Y., Song, F. and Liu, F. 2012. Differential responses of stomatal morphology to Partial Root-zone Drying and deficit irrigation in potato leaves under varied nitrogen rates. *Science of Horticulture*. 145: 76–83.
- Ye, Y., Liang, X., Chen, Y., Liu, J., Gu, J., Guo, R. and Li, L. 2013. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crops Research*. 144: 212-224.
- Zhang, S.Y., Zhang, G.C., Gu, S.Y., Xia, J.B. and Zhao, J.K. 2010. Critical responses of photosynthetic efficiency of goldspur apple tree to soil water variation in semiarid loess hilly area. *Photosynthetica*. 48: 589-595.
- Zhang, X., Liu, W., Lv, Y., Li, T., Tang, J., Yang, X., Bai, J., Jin, X. and Zhou, H. 2022. Effects of drought stress during critical periods on the photosynthetic characteristics and production performance of naked oat (*Avena nuda* L.). *Scientific Reports*. 12(1):11199.
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F. and Wu, J. 2020. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water*. 12(8):2127.
- Zhenchang, W., Xiaofei, Y., Liang, F. and Jianbin, Z. 2016. Partial rootzone drying irrigation increase root surface area, root hydraulic conductivity and water use efficiency in maize. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*. 4: 146-153.
- grown using different planting patterns and deficit irrigation regime. *Agricultural Water Management*. 105: 8-12.
- Rahbarian, R., Khavari-Nejad, R., Ganjeali, A., Bagheri, A. and Najafi, F. 2011. Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Acta biologica Cracoviensia. Series botânica*. 53(1).
- Schultz, H.R. 2016. Global climate change, sustainability, and some challenges for grape and wine production. *Journal of Wine Economics*. 11(1):181-200.
- Sepaskhah, A.R. and Ahmadi, S. H. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production*, 4: 241-258.
- Sidhu, R.K., Kumar, R., Rana, P.S. and Jat, M.L. 2021. Automation in drip irrigation for enhancing water use efficiency in cereal systems of South Asia: status and prospects. *Advances in agronomy*. 167: 247-300.
- Signarbieux, C. and Feller, U. 2011. Non-stomatal limitations of photosynthesis in grassland species under artificial drought in the field. *Environmental and Experimental Botany*. 71(2):92-197.
- Slamini, M., Sbaa, M., Arabi, M. and Darmous, M. 2022. Review on Partial Root-zone Drying irrigation: Impact on crop yield, soil and water pollution. *Agricultural Water Management*. 271: 107807.
- Tawfik, R.S. and El-Mouhamady, A.B.A. 2019. Molecular genetic studies on abiotic stress resistance in sorghum entries through using half diallel analysis and inter-simple sequence repeat (ISSR) markers. *Bulletin of the National Research Centre*. 43(1): 1-17.
- Ullah, A., Manghwar, H., Shaban, M., Khan, A.H., Akbar, A., Ali, U., Ali, E. and Fahad, S. 2018. Phytohormones enhanced drought tolerance in plants: a coping strategy. *Environmental Science and Pollution Research*. 25: 33103-33118.
- Wakrim, R., Wahbi, S., Tahy, H., Aganchich, B. and Serraj, R. 2005. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agriculture, ecosystems and environment*, 106(2-3):275-287.
- Wang, S., X. Mo, S. Hu, S. Liu, and Z. Liu. 2018.

## Effects of Deficit Irrigation (RDI) and Partial Root-Zone Drying (PRD) on Water Productivity and Photosynthetic Characteristics of Mungbean (*Vigna radiate* L.)

N. Rezaei<sup>1</sup>, H. Alizadeh<sup>2\*</sup>, Y. Alizadeh<sup>3</sup> and E. Zeidali<sup>3</sup>

Received: Feb.25, 2023

Accepted: May.08, 2023

### Abstract

In order to study the effect of deficit irrigation (DI) and partial Root-Zone Drying (PRD) on water productivity and photosynthetic characteristics of mungbean, a field experiment was conducted as a split-plot experiment in a randomized complete block design with three replications and nine treatments at the research farm, Ilam University during the growing season in 2021. Treatments included three levels of deficit irrigation (50, 70 and 100% of water requirement) as main plots and three irrigation methods including; usual irrigation, fixed partial root-zone drying, and alternative partial root-zone drying as subplots. The results showed that the effect of drought stress on water productivity, carboxylation efficiency, and photosynthetic water use efficiency was significant. Also, the Interactive effect of drought stress and irrigation method on water productivity and carboxylation efficiency was significant. The highest amount of water productivity, in all irrigation methods, was found in 75% water requirement treatment. The highest water productivity (0.49 kg/m<sup>3</sup>) was recorded with the alternative PRD method in 75 % of the water requirement level. There was no significant difference between alternative PRD and DI methods at 75 and 100 % of water requirement levels on water productivity. In severe drought stress, water productivity in the alternative PRD method was significantly higher than the other two methods. Therefore, in drought stress conditions, using the PRD method was effective in reducing the effects of drought stress.

**Keywords:** Correlation coefficient, Carboxylation efficiency, Drought stress, Intrinsic water use efficiency, Transpiration

1- M.S. Student, Department of agronomy and Plant Breeding, Faculty of agriculture, Ilam University, Iran

2 -Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of agriculture, Ilam University, Iran

3-Assistant Professor, Department of agronomy and Plant Breeding, Faculty of agriculture, Ilam University, Iran

(\* - Corresponding Author Email: H.alizadeh@Ilam.ac.ir)