

تأثیر کاربرد کودهای پتاسیمی بر فلورسانس کلروفیل و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) رقم طارم هاشمی در شرایط کم‌آبیاری تنظیم‌شده

سید حسین محسنی^۱، محمدعلی اسماعیلی^۱، همت‌اله پیردشتی^{۲*}، رحمت عباسی^۱، مرتضی نصیری^۳

^۱ گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۲ گروه زراعت، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۳ پژوهشگاه مؤسسه تحقیقات برنج، معاونت مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و کشاورزی، آمل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۵/۳۰)

چکیده

به‌منظور بررسی اثر کم‌آبیاری و کارایی انواع کودهای پتاسیمی بر بهبود میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و شاخص‌های فلورسانس کلروفیل در برنج (رقم طارم هاشمی)، پژوهشی مزرعه‌ای در سال ۱۳۹۵ در دو ایستگاه مؤسسه تحقیقات برنج (آمل) و مزرعه الگویی واقع در شهرستان سوادکوه به‌صورت اسپلیت‌پلات در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. روش‌های مختلف آبیاری در دو سطح (غرقاب کامل و غرقاب‌نمودن پس از کاهش ارتفاع آب به پایین‌تر از ۱۰ سانتی‌متر) و کاربرد کودهای پتاسیمی، شامل پتاسیم سولفات، پتاسیم کلرید و کود زیستی، در نه سطح بودند. براساس یافته‌ها، با اعمال کم‌آبیاری میزان کلروفیل a ، b ، $a+b$ ، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر، سرعت انتقال الکترون در فتوسیستم II (ETR) و عملکرد شلتوک در مقایسه با تیمار آبیاری غرقاب به‌طور معنی‌داری در هر دو ایستگاه کاهش یافت. این پژوهش حاکی از اثر مثبت تیمارهای کاربرد کود پتاسیم در شرایط کم‌آبی از طریق افزایش معنی‌دار محتوی کلروفیل و شاخص خاموشی غیرفتوشیمیایی (NPQ) بود. بیشترین میزان عملکرد شلتوک از برهمکنش تیمارهای آبیاری غرقاب و کاربرد ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایه و ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به‌صورت سرک، معادل ۴۹۴۵ و ۴۷۷۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب در ایستگاه‌های آمل و سوادکوه به‌دست آمد. با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد شلتوک با صفات محتوی کلروفیل a ، کلروفیل کل، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) و ETR می‌توان اظهار داشت که تیمار کاربرد ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایه و ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به‌صورت سرک بیشترین کارایی را از لحاظ صفات مورد بررسی به‌ویژه در شرایط کم‌آبی داشت.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری مصرف آب، رنگیزه‌های فتوسنتزی، پتاسیم سولفات، کارایی کوانتومی فتوسیستم II، پتاسیم کلرید

مقدمه

زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در حدود ۵۳۰ هزار هکتار با میانگین عملکرد ۴۴۳۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شد (آمارنامه سازمان جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴). امروزه مهم‌ترین چالش در رابطه با تولید برنج، افزایش بهره‌وری آب و تولید برنج بیشتر با آب

برنج (*Oryza sativa* L.) محصولی است که از نظر اهمیت و سطح زیرکشت بعد از گندم در رتبه دوم جهان قرار دارد (FAO, 2015). در ایران نیز، سطح زیرکشت این محصول در سال

پتاسیم موجود در خاک برای گیاهان قابل استفاده است (Yaghoubi Khanghahi *et al.*, 2017). لذا به منظور تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه، این عنصر بایستی به طریقی از شکل‌های تثبیت‌شده و معدنی به شکل‌های تبدیلی و محلول تبدیل شود (دردی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). در همین راستا، مشاهده شده است که حتی در مزارعی که نتیجه تجزیه خاک آنها مقادیر پتاسیم قابل جذب را بسیار بیشتر از حد بحرانی نشان می‌دهد، علائم کمبود پتاسیم مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط غرقابی و احیایی، ریشه برنج قادر نیست از پتاسیم موجود در خاک استفاده نماید (ملکوتی و افخمی، ۱۳۷۸). به عبارت دیگر، در اراضی غرقابی به علت عدم تهویه مناسب و وجود گاز هیدروژن سولفید که نتیجه تجزیه و تخمیر ناقص مواد آلی است، جذب پتاسیم به کندی صورت می‌گیرد. همچنین، شستشوی پتاسیم نیز در اینگونه خاک‌ها زیاد بوده و لذا مصرف پتاسیم در این گونه خاک‌ها ضرورت دارد (کریمی مریدانی، ۱۳۹۳).

نتایج پژوهش‌ها روی برنج (آقاجانی دلاور، ۱۳۹۵) و ذرت (کاظمی، ۱۳۹۵) حاکی از تأثیر مثبت کاربرد کود بر بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط کم‌آبیاری بود. در همین راستا، گزارش گردید کمبود پتاسیم در گیاه موجب کاهش فتوسنتز خالص و کاهش چشمگیر عملکرد گیاهان زراعی می‌گردد (ملکوتی و افخمی، ۱۳۷۸). نتایج پژوهش‌های دیگری حاکی از اثر معنی‌دار کاربرد پتاسیم بر ماده خشک کاه و عملکرد دانه در مقایسه با تیمار شاهد در برنج بود (Qi-chun *et al.*, 2011; اسدی‌صنم و همکاران، ۱۳۹۳). در آزمایش‌های دیگری نشان داده شد که کود پتاسیم تأثیر مثبتی در پرشدن دانه‌ها و افزایش میزان عملکرد دانه دارد در حالیکه کمبود آن موجب عقیمی گرده‌ها و کاهش تعداد دانه‌های پرشده در برنج می‌گردد (Pirdashti *et al.*, 2004). براساس گزارش‌ها، کودهای پتاسیم سولفات و پتاسیم کلرید از کودهای رایج پتاسیمی هستند که با کارآیی یکسانی در برنج غرقابی، قابل کاربرد هستند (محمدیان، ۱۳۹۵). به‌طوریکه گزارش گردید مصرف کود پتاسیم کلرید به

کمتر است، چرا که این گیاه با مصرف بیش از ۸۰ درصد کل منابع آب در آسیا به‌عنوان بزرگترین مصرف‌کننده آب بین همه محصولات کشاورزی شناخته شده است (Mohd Zain and Ismail, 2016). از سوی دیگر، راندمان آبیاری در کشت برنج نیز نسبت به دیگر غلات بسیار کمتر است، به‌طوریکه برای تولید یک کیلوگرم برنج بیش از سه برابر گندم آب لازم است (Mahajan, 2008). بر این اساس، استفاده از روش‌های جدید مدیریت آبیاری در جهت افزایش بهره‌وری در مصرف آب و کاهش هزینه پروژه‌های آبیاری امری اجتناب‌ناپذیر است (یوسفیان، ۱۳۸۹). آبیاری به روش خشک و مرطوب‌شدن متناوب (Alternate wetting and drying) روشی است جهت کاهش مصرف آب و نیز جلوگیری از اثرات مضر روش غرقاب دائم (Flooding irrigation) در شالیزار، به معنای رساندن آب به‌طور دوره‌ای و با فواصل معین، به‌طوریکه در این روش به‌جای اینکه مزرعه در طول دوره رشد به‌طور دائم در حالت غرقاب باشد، به‌صورت متناوب به مزرعه خشکی اعمال می‌شود (عرب‌زاده و آقاجانی، ۱۳۸۱؛ صداقت و همکاران، ۱۳۹۳).

از سوی دیگر، موفقیت در تولید برنج بستگی به فراهم نمودن حاصل‌خیزی مناسب خاک با استفاده متعادل از کودهای شیمیایی و تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه دارد (Bakhshandeh *et al.*, 2017b). پتاسیم از عناصر پر مصرف مورد نیاز گیاهان بوده و از نظر میزان جذب در گیاه برنج با نیتروژن برابری می‌کند (میرینا و محمدیان، ۱۳۸۴). بیشترین نقش این عنصر در برنج شامل افزایش سطح برگ، افزایش میزان کلروفیل، تأخیر در ریزش برگ‌ها (ملکوتی و کاووسی، ۱۳۸۳)، افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی (Mohd Zain and Ismail, 2016)، افزایش بهره‌وری آب (کریمی مریدانی، ۱۳۹۳)، افزایش استحکام ساقه و کاهش ورس (Kong *et al.*, 2014) است. اغلب خاک‌ها دارای مقادیر نسبتاً زیادی پتاسیم کل هستند، به‌طوریکه میزان پتاسیم در خاک حدود شش برابر مقدار نیتروژن و ۱۶ برابر فسفر است (کریمی مریدانی، ۱۳۹۳). با این وجود، تنها بخش بسیار ناچیزی (حدود دو درصد) از

اثر کاربرد انواع کودهای شیمیایی و زیستی پتاسیمی بر فلورسانس، مقدار و محتوی کلروفیل برگ برنج رقم طارم هاشمی در دو منطقه در رژیم‌های مختلف آبیاری مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹۵ در دو مکان واقع در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات برنج کشور- معاونت مازندران (آمل) با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۳ دقیقه شرقی و در مزرعه الگویی واقع در روستای آهانگرکلای شهرستان سوادکوه شمالی با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی به صورت آزمایش اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در کرت اصلی دو سطح آبیاری شامل غرقاب کامل و آبیاری به روش خشک و مرطوب شدن متناوب در نظر گرفته شد. تا ۱۴ روز بعد از نشاکاری هر دو روش آبیاری همانند روش معمول (غرقاب کامل) بود. سپس در تیمار آبیاری غرقابی، این شیوه ادامه و در تیمار خشک و مرطوب شدن متناوب، پس از کاهش ارتفاع آب به پایین‌تر از ۱۰ سانتی‌متر از سطح خاک، آبیاری مجدد مزرعه انجام گرفت. بدین‌منظور از روش ابداعی مؤسسه بین‌المللی تحقیقات برنج ایری (IRRI, 2005) در اجرای روش آبیاری خشک و تر نمودن متناوب زمین استفاده گردید. در این روش لوله‌های پلاستیکی منفذدار به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر در خاک شالیزار در کرت‌ها قرار داده شد، به‌نحویکه حداقل ۱۰ سانتی‌متر آن در بالای سطح خاک قرار گرفت و سپس تمامی گل و لای موجود در آن تا انتهای عمق لوله در داخل زمین تخلیه گردید (شکل ۱). ارتفاع آب در داخل هر کرت، از طریق لوله‌های نصب‌شده در داخل زمین اندازه‌گیری و سپس در صورت نیاز و براساس تیمار تعریف‌شده و با توجه به میزان بارندگی (جدول ۱)، آبیاری به صورت غرقاب (پنج سانتی‌متر بالای سطح خاک) انجام و بلافاصله شماره کنتور خوانده و

دلیل ارزان‌تر بودن و افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی محصول مقایسه با پتاسیم سولفات ارجحیت داد (ملکوتی و کاووسی، ۱۳۸۳). اعمال آبیاری تناوبی نیز، ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، از پیدایش شرایط مزبور در خاک جلوگیری کرده و راندمان مصرف پتاسیم را افزایش می‌دهد (Dobermann *et al.*, 1996).

امروزه با توجه به افزایش هزینه‌های نهاده‌های مصرفی و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، استفاده از کودهای زیستی در جهت بهبود تأمین عناصر غذایی برای رسیدن به کشاورزی پایدار امری ضروری است (Park *et al.*, 2010). بنا به تعریف، کود زیستی متشکل از یک یا چند نوع ریزجاندار مفید به همراه مواد نگهدارنده و یا فرآورده‌های متابولیکی آنها است که به‌منظور تأمین عناصر غذایی گیاهان استفاده می‌شود (Vessy, 2003). ریزجانداران مختلف قادرند سیلیکات‌ها را تجزیه کرده و عناصری چون پتاسیم، فسفر، آهن، روی و سیلیسیم را آزاد کنند که در این میان باکتری‌ها از اهمیت بیشتری برخوردارند (Parmar and Sindhu, 2013). از این باکتری‌ها که به باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات معروفند کود زیستی پتاسیم تهیه می‌گردد (Yaghoubi Khanghahi *et al.*, 2017).

براساس آنچه گفته شد و با توجه به تشدید پدیده کم‌آبی در استان‌های شمالی به‌عنوان اصلی‌ترین مناطق تولید برنج و همچنین مصرف بالای آب در اراضی شالیزاری (آقاجانی دلاور، ۱۳۹۵)، لزوم بازنگری در چگونگی ارائه و مدیریت آب در این اراضی، جهت به حداقل رساندن تأثیرات مخرب تنش کم‌آبی بر گیاه برنج و بالابردن تولید محصول آن، بیش از همیشه احساس می‌شود. از سوی دیگر، کاربرد کودهای پتاسیمی در اراضی شالیزاری نسبت به سایر کودهای پرمصرف بسیار ناچیز است (Yaghoubi Khanghahi *et al.*, 2017) و این در حالی است که اثر این کودها در شرایط کم‌آبیاری بر گیاه برنج و خواص کمی و کیفی محصول آن نیز حائز اهمیت است. به‌ویژه اگر همراه با این بررسی، میزان اثربخشی انواع کودهای پتاسیمی مصرفی رایج و شیوه‌های کاربرد آنها نیز بر صفات مورد بررسی گیاه برنج مشخص گردد. بنابراین، در این تحقیق



شکل ۱- لوله‌های مشبک کار گذاشته شده در کرت‌ها جهت اعمال تیمار کم آبیاری

جدول ۱- آمار هواشناسی در طول دوره رشد برنج (بازه زمانی اول اردیبهشت تا سی و یکم مرداد ۱۳۹۵)

| منطقه | مجموع ساعات آفتابی | مجموع بارندگی (میلی‌متر) | متوسط رطوبت نسبی (درصد) | متوسط درجه حرارت (سانتی‌گراد) |
|------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| مؤسسه تحقیقات برنج کشور- آمل | ۸۰۹/۲ | ۱۱۷/۰ | ۷۸/۳ | ۲۴/۶۶ |
| شهرستان سوادکوه شمالی | ۵۰۶/۷ | ۴۴۰/۶ | ۸۰/۳ | ۲۱/۲۲ |

جز ارقام زودرس و پابلند بوده که در رده ارقام کیفی و با عملکرد پایین قرار می‌گیرد و بیشترین سطح زیرکشت برنج را در سطح استان مازندران (حدود ۴۱ درصد) به خود اختصاص داده است (آمارنامه سازمان جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴). انتقال و کاشت نشاها در زمین اصلی (شالیزار) برای ایستگاه مؤسسه تحقیقات برنج، در تاریخ ۲۴ اردیبهشت و برای ایستگاه سوادکوه شمالی، در تاریخ ۱۸ اردیبهشت انجام گرفت. نشاها در مرحله سه الی چهار برگ، زمانی که ارتفاع نشاها به ۲۰ سانتی‌متر رسید، به صورت تک‌خال و با فاصله ۲۰×۲۰ سانتی‌متر به زمین اصلی انتقال داده شدند. علاوه بر این، وجین دستی در دو مرحله و مبارزه با آفات و بیماری‌های برنج براساس دستورالعمل فنی مؤسسه تحقیقات برنج کشور انجام پذیرفت. ابعاد کرت‌ها ۳ × ۲ متر بوده و جهت جلوگیری از نفوذ آب بین کرت‌ها، فاصله بین کرت‌های داخلی نیم متر و فاصله بین کرت‌های اصلی یک متر تعیین و با پوشش نایلونی کلیه مرزها عایق‌بندی گردید. کودهای نیتروژن و فسفر براساس نتایج تجزیه خاک (جدول ۳) و توصیه مؤسسه تحقیقات برنج

میزان آبیاری برحسب لیتر ثبت گردید. با توجه به اهمیت زیاد آب در مرحله گلدهی و به منظور جلوگیری از عقیم شدن سنبلچه‌ها، یک هفته قبل تا یک هفته بعد از گلدهی مزرعه به صورت غرقاب درآمد (آقاجانی دلاور، ۱۳۹۵).

کرت فرعی شامل نه سطح کاربرد مقادیر مختلف کودهای پتاسیمی بود (جدول ۲). کودهای پتاسیم سولفات و پتاسیم کلرید از کودهای رایج پتاسیمی هستند که با کارایی یکسانی در زراعت برنج مورد استفاده قرار می‌گیرند (عرفانی، ۱۳۹۵). کود زیستی پتاسیمی مورد استفاده، تولید شرکت زیست‌فناور سبز و شامل دو جدایه سودوموناس کورینسیس (*Pseudomonas koreensis*) و سودوموناس ونکوورنسیس (*Pseudomonas vancoverensis*) بود (به صورت پودر، 10^6 CFU ml⁻¹). جهت تلقیح با باکتری گیاهچه‌های برنج پیش از نشاکاری به مدت پنج ساعت در محلول حاوی کود زیستی قرار گرفتند (Bakhshandeh et al., 2017a). همچنین، کاربرد کود پتاسیمی به‌عنوان سرک در مرحله پنجه‌زنی صورت گرفت. در این پژوهش از رقم طارم هاشمی استفاده شد. این رقم

جدول ۲- سطوح مختلف تیمار کاربرد کودهای پتاسیمی به کار رفته در پژوهش

| سطح | کود پتاسیم سولفات | کود پتاسیم کلرید | کود زیستی |
|-----|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| F1 | - | - | - |
| F2 | ۱۰۰٪ به صورت پایه | - | - |
| F3 | ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک | - | - |
| F4 | - | ۱۰۰٪ به صورت پایه | - |
| F5 | - | ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک | - |
| F6 | - | - | ۱۰۰٪ |
| F7 | ۵۰٪ به صورت پایه | - | ۱۰۰٪ |
| F8 | - | ۵۰٪ به صورت پایه | ۱۰۰٪ |
| F9 | ۵۰٪ به صورت پایه | ۵۰٪ به صورت سرک | - |

جدول ۳- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دو منطقه آمل و سوادکوه شمالی

| منطقه | بافت خاک | کربن آلی (درصد) | اسیدیته کل اشباع (دسی‌زیمنس بر متر) | هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) | نیتروژن کل (درصد) | فسفر قابل | پتاسیم قابل |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|--|--|-------------------------|-----------|-------------|
| | | | | | | جذب | جذب |
| ایستگاه مؤسسه تحقیقات برنج آمل | سیلتی- لومی | ۳/۳ | ۶/۹۷ | ۱/۹۴ | ۰/۲۳ | ۶/۵ | ۱۴۰ |
| ایستگاه سوادکوه شمالی | سیلتی- لومی- رسی | ۲/۸۷ | ۷/۲۸ | ۱/۲۴ | ۰/۱۷ | ۶/۰ | ۱۳۹ |

کشور به صورت یکنواخت در کلیه کرت‌ها مصرف گردید. بر این اساس، ۱۲۵ و ۱۳۵ کیلوگرم کود اوره و ۸۰ و ۱۱۰ کیلوگرم کود فسفات از منبع سوپرفسفات تریپل، به ترتیب در ایستگاه‌های معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور و ایستگاه سوادکوه شمالی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، میزان کودهای پتاسیم سولفات (۵۰٪ K₂O) و پتاسیم کلرید (۶۰٪ K₂O) برای ایستگاه مؤسسه تحقیقات برنج، به ترتیب ۱۱۵ و ۱۰۰ کیلوگرم و در ایستگاه سوادکوه شمالی ۱۳۵ و ۱۲۰ کیلوگرم جهت اعمال تیمارهای کاربرد کود شیمیایی پتاسه در نظر گرفته شد.

غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان سبزی‌نگی برگ:
برای اندازه‌گیری میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی یک هفته قبل از گلدهی گیاه شش عدد پانچ از برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته برنج

تهیه و در ۸ میلی‌لیتر متانول غوطه‌ور و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و دمای اتاق قرار گرفتند. سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر (Analytic jena - SPEKOL 1300)، میزان نور جذبی محلول در طول موج‌های ۶۶۵/۲، ۶۵۲/۴ و ۴۷۰ نانومتر خوانده و ثبت شد. در نهایت میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کارتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ به ترتیب با استفاده از روابط ۱ تا ۴ محاسبه گردید (Porra, 2002).

$$\text{Chl}_a (\mu\text{g/ml}) = 16.72 A_{665.2} - 9.16 A_{652.4} \quad (1)$$

$$\text{Chl}_b (\mu\text{g/ml}) = 34.09 A_{652.4} - 15.28 A_{665.2} \quad (2)$$

$$\text{Chl}_{(a+b)} (\mu\text{g/ml}) = c_a + c_b \quad (3)$$

$$\text{Car} = (1000 A_{470} - 1.8 C_a - 85.02 C_b) / 198 \quad (4)$$

در این رابطه‌ها C_a، C_b و C_(a+b) به ترتیب کلروفیل a، b و کلروفیل کل و A₄₇₀، A_{652.4}، A_{665.2} میزان نور جذبی محلول در طول موج‌های ۶۶۵/۲، ۶۵۲/۴ و ۴۷۰ نانومتر است. جهت

رطوبت ۱۴ درصد محاسبه و برحسب کیلوگرم بر هکتار گزارش گردید. بر این اساس، مرحله برداشت در ایستگاه‌های مؤسسه تحقیقات برنج و سوادکوه شمالی، به ترتیب مصادف با ۲۵ و ۲۸ مرداد بود. سپس بهره‌وری مصرف آب، از نسبت عملکرد شلتوک بر مجموع میزان آب آبیاری و بارندگی در طول فصل رشد، محاسبه گردید (آقاجانی دلاور، ۱۳۹۵). در پایان، داده‌ها پس از آزمون نرمال بودن با نرم‌افزار MSTAT-C تجزیه و تحلیل و میانگین صفات مورد بررسی توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند. پیش از انجام آنالیز میانگین مربعات و به‌منظور تعیین یکنواختی و متجانس بودن واریانس اشتباه آزمایش‌های مختلف از آزمون بارتلت استفاده گردید (کاظمی، ۱۳۹۵).

نتایج

از آنجایی که آزمون همگنی واریانس آزمایش (بارتلت) دلالت بر عدم یکنواختی واریانس آزمایش برای صفات مورد مطالعه در این پژوهش (به غیر از عدد کلروفیل متر و نسبت کلروفیل a/b) در دو منطقه داشت، لذا صفات مورد مطالعه در هر مکان به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۴).

براساس تجزیه و تحلیل میانگین مربعات صفات مورد مطالعه، اثرات متقابل کم‌آبیاری و تیمار کاربرد کود بر میزان صفات کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a/b، میزان کارتنوئید، ETR، Fo، عملکرد شلتوک و بهره‌وری مصرف آب در هر دو ایستگاه و بر صفات Fm، Y(NPQ) و NPQ، در ایستگاه سوادکوه اثر معنی‌داری داشت. همچنین، تیمار کم‌آبیاری اثر معنی‌داری بر صفات عدد کلروفیل متر، Fm، Fv، Y(NPQ)، Y(NO) و NPQ، در ایستگاه آمل و بر صفات Fv و Y(NPQ)، در ایستگاه سوادکوه داشت. تفاوت بین انواع کود پتاسیمی نیز از نظر صفات مرتبط با رنگیزه‌های فتوسنتزی، در هر دو ایستگاه و NPQ، در ایستگاه آمل و Y(NO) در ایستگاه سوادکوه معنی‌دار بود (جدول ۵، ۶، ۷ و ۸).

ایستگاه مؤسسه تحقیقات برنج کشور - معاونت مازندران (آمل): براساس یافته‌ها، با اعمال تیمار کم‌آبیاری میزان عدد

اندازه‌گیری میزان سبزینه‌گی برگ نیز از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-502, Minolta, Japan) استفاده گردید. اندازه‌گیری از شش نقطه برگ کاملاً توسعه‌یافته در مرحله گلدهی انجام و میانگین اعداد به‌دست آمده به‌عنوان عدد نهایی در محاسبه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

فلورسانس کلروفیل: در زمان یک هفته قبل از گلدهی اندازه‌گیری پارامترهای فلورسانس کلروفیل در آخرین برگ توسعه‌یافته با دستگاه فلورومتر (PAM 2500, Walz, Germany) و براساس روش Genty و همکاران (۱۹۸۹) صورت گرفت. بدین‌منظور، برگ‌ها با استفاده از گیره‌های مخصوص دستگاه به‌مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفتند (آقاجانی دلاور، ۱۳۹۵). فلورسانس حداقل (Fo) با همه مراکز واکنشی باز فتوسیستم II، توسط نور با شدت پایین (۰/۱ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) و فلورسانس حداکثر (Fm) با تابش پالس اشباع نوری (۸۰۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) به‌مدت یک ثانیه در برگ‌های سازگار به تاریکی تعیین شد. سپس با تابش نور مرئی سفید رنگ (۶۸۵ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) میزان فلورسانس پایدار (Ft) ثبت و مجدداً پالس اشباع نوری (۸۰۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) اعمال و میزان فلورسانس حداکثر (Fm) در برگ‌های سازگار به روشنایی تعیین شد. سپس فلورسانس حداقل در مرحله روشنایی (Fo) با تابش نور قرمز دور ثبت گردید. با استفاده از پارامترهای تعیین‌شده در برگ‌های سازگار به تاریکی و روشنایی میزان فلورسانس حداقل (Fo)، فلورسانس حداکثر (Fm)، فلورسانس متغیر (Fv)، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II (Y(NPQ))، کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی غیرتنظیم‌شده فتوسیستم II (Y(NO))، خاموشی غیرفتوشیمیایی (NPQ) و سرعت انتقال الکترون در فتوسیستم II (ETR) محاسبه گردید (Li et al., 2008).

بوته‌ها در مرحله رسیدگی کامل محصول، با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای (دو مترمربع از متن هر کرت) برداشت و خرمن‌کوبی شده و میزان عملکرد نهایی دانه آن براساس

جدول ۴- آزمون همگنی واریانس (آزمون بارتلت) در دو منطقه آمل و سوادکوه شمالی

| کای اسکوار | صفات | کای اسکوار | صفات |
|------------|---|------------|----------------------|
| ۲۲/۸۷ ** | حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) | ۱۳/۵۷ ** | کلروفیل a |
| ۱۱/۷۰ ** | کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم شده فتوسیستم II (Y(NPQ)) | ۱۴/۳۰ ** | کلروفیل b |
| ۶۴/۰۴ ** | کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی غیر تنظیم شده فتوسیستم II (Y(NO)) | ۱۹/۵۲ ** | کلروفیل a+b |
| ۸۸/۵۵ ** | خاموشی غیرفتوشیمیایی (NPQ) | ۱/۹۴ ns | کلروفیل a/b |
| ۲۳۵/۳۹ ** | سرعت انتقال الکترون در فتوسیستم II (ETR) | ۳/۵۲ * | کارتونوئید |
| ۱/۷۹ ns | عدد کلروفیل متر (SPAD) | ۶۳/۹۳ ** | فلورسانس حداقل (Fo) |
| ۲۰۵/۷۵ ** | عملکرد شلتوک | ۹۳/۱۰ ** | فلورسانس حداکثر (Fm) |
| ۲۷۱/۴۶ ** | بهره‌وری مصرف آب | ۹۰/۷۱ ** | فلورسانس متغیر (Fv) |

** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد است.

جدول ۵- میانگین مربعات اثر تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد کود پتاسیمی بر میزان عدد کلروفیل متر، کلروفیل a، b، کل، a/b و کارتونوئید در برنج در ایستگاه مؤسسه تحقیقات برنج

| میانگین مربعات | | | | | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|----------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| کارتونوئید | کلروفیل a/b | کلروفیل کل | کلروفیل b | کلروفیل a | عدد کلروفیل متر | |
| ۰/۰۴۶ ns | ۰/۰۶۳ ns | ۱/۹۲۸ ns | ۰/۰۲۸ ns | ۱/۵۴۳ ns | ۴/۰۳۶ ns | تکرار |
| ۲/۹۱۱ * | ۰/۱۳۸ ns | ۳۶/۷۱۴ * | ۱/۹۳۱ ** | ۲۱/۸۰۶ * | ۲۲/۳۳۷ * | آبیاری (A) |
| ۰/۰۵۰ | ۰/۱۹۱ | ۰/۶۸۵ | ۰/۰۱۴ | ۰/۶۱۶ | ۲۰/۷۳۲ | خطای A |
| ۰/۳۳۴ ** | ۱/۲۹۰ ** | ۵/۵۹۳ ** | ۰/۷۰۳ ** | ۳/۵۰۳ ** | ۴/۳۲۹ ns | کود پتاسیمی (B) |
| ۰/۲۷۰ ** | ۰/۱۷۹ * | ۳/۶۸۲ ** | ۰/۲۲۷ ** | ۲/۲۴۳ ** | ۱/۱۴۴ ns | B × A |
| ۰/۶۶۷ | ۰/۰۳۹ | ۰/۷۶۰ | ۰/۱۹۳ | ۰/۰۹۹ | ۴/۱۴۵ | خطای کل |
| ۴/۵۱ | ۸/۶۶ | ۸/۲۴ | ۷/۳۸ | ۱۰/۹۰ | ۱۱/۷۲ | ضریب تغییرات |

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار است.

نداشت. سطوح مختلف تیمار کاربرد کود پتاسیمی اثر معنی‌داری بر میزان عدد کلروفیل متر، Fv، Fm، Y(NPQ) و Y(NO) نداشت اما میزان NPQ را در مقایسه با تیمار بدون کاربرد کود به طور معنی‌داری افزایش داد. بر این اساس، بیشترین میزان NPQ، معادل ۱/۵۸ از تیمار F9 حاصل شد (جدول ۹).

مطابق نتایج، بیشترین میزان کلروفیل a و a+b از ترکیب تیماری آبیاری غرقابی و تیمار F8، به ترتیب به میزان ۱۱/۶ و ۱۴/۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ، حاصل شد که به طور

کلروفیل متر، Fv و Fm در مقایسه با تیمار آبیاری غرقاب به طور معنی‌داری کاهش یافت. میزان صفات یادشده در تیمار کم آبیاری با کاهش ارتفاع آب به ۱۰ سانتی‌متری عمق خاک، به ترتیب ۵/۲، ۵ و ۵/۶ درصد کمتر از روش آبیاری غرقاب بود. از سوی دیگر، میزان Y(NPQ)، Y(NO) و NPQ به طور معنی‌داری افزایش یافت، به طوری که میزان آنها در تیمار کم‌آبیاری، به ترتیب ۶/۶، ۹/۱ و ۱۹/۱ درصد بیشتر از تیمار آبیاری غرقاب بود. مطابق نتایج، بین تیمار کم‌آبیاری و آبیاری غرقاب تفاوت معنی‌داری از لحاظ میزان Fv/Fm وجود

جدول ۶- میانگین مربعات اثر تیمارهای کم آبیاری و کاربرد کود پتاسیمی بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل در برنج در ایستگاه آمل

| میانگین مربعات | | | | | | | | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------------|
| ETR | NPQ | Y(NO) | Y(NPQ) | Fv/Fm | Fv | Fm | Fo | | |
| ۴/۷۳۸ ^{ns} | ۰/۲۲۵ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۰۳ ^{ns} | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۳۳۱ ^{ns} | ۰/۴۳۱ ^{ns} | ۰/۰۱۶ ^{ns} | | |
| ۱۱/۹۴۰ [*] | ۰/۵۲۱ [*] | ۰/۰۰۳ [*] | ۰/۰۰۵ [*] | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۸۶۳ [*] | ۱/۱۳۷ [*] | ۰/۰۱۹ ^{ns} | ۱ | آبیاری (A) |
| ۰/۲۸۵ | ۰/۴۷۷ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۲۴۰ | ۰/۲۰۴ | ۰/۰۰۲ | ۲ | خطای A |
| ۰/۳۸۴ ^{ns} | ۰/۵۹۱ [*] | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۸۵ ^{ns} | ۰/۱۱۴ ^{ns} | ۰/۰۰۴ ^{ns} | ۸ | کود پتاسیمی (B) |
| ۱/۲۰۲ [*] | ۰/۲۹۲ ^{ns} | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۴۱ ^{ns} | ۰/۰۴۰ ^{ns} | ۰/۰۰۹ [*] | ۸ | B × A |
| ۰/۳۵۱ | ۰/۰۴۴ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۱۴۹ | ۰/۱۵۸ | ۰/۰۰۲ | ۳۲ | خطای کل |
| ۹/۳۰ | ۱۴/۴۷ | ۹/۵۵ | ۱۱/۳۵ | ۲/۳۷ | ۸/۳۷ | ۶/۷۳ | ۳/۴۹ | | ضریب تغییرات |

***، * و ns به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی دار است.

جدول ۷- میانگین مربعات اثر تیمارهای کم آبیاری و کاربرد کود پتاسیمی بر میزان عدد کلروفیل متر، کلروفیل a، b، کل، a/b و کارتنوئید در برنج در ایستگاه سوادکوه

| میانگین مربعات | | | | | | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|-----------------|
| کارتنوئید | کلروفیل a/b | کلروفیل کل | کلروفیل b | کلروفیل a | عدد کلروفیل متر | | |
| ۰/۱۹۴ ^{ns} | ۰/۳۵۸ ^{ns} | ۰/۰۰۸ ^{ns} | ۰/۰۲۶ ^{ns} | ۰/۰۲۱ ^{ns} | ۴/۶۹۷ ^{ns} | ۲ | تکرار |
| ۰/۹۷۵ ^{ns} | ۶/۴۶۶ [*] | ۱۱/۵۴۸ [*] | ۱/۱۱۳ ^{**} | ۵/۴۹۱ ^{ns} | ۱۲/۹۰۷ ^{ns} | ۱ | آبیاری (A) |
| ۰/۱۹۸ | ۰/۱۳۱ | ۰/۴۸۲ | ۰/۰۱۸ | ۰/۴۰۹ | ۴/۶۲۷ | ۲ | خطای A |
| ۰/۳۲۹ ^{**} | ۲/۹۷۶ ^{**} | ۲/۵۲۳ ^{**} | ۰/۲۰۸ ^{**} | ۱/۹۳۵ ^{**} | ۱۰/۳۱۲ ^{ns} | ۸ | کود پتاسیمی (B) |
| ۰/۰۴۸ ^{**} | ۱/۶۹۴ [*] | ۰/۳۷۸ ^{**} | ۰/۰۶۸ ^{**} | ۰/۲۷۲ ^{**} | ۰/۶۷۰ ^{ns} | ۸ | B × A |
| ۰/۰۹۳ | ۰/۳۱۲ | ۰/۵۰۹ | ۰/۰۱۲ | ۰/۵۰۶ | ۵/۲۸۱ | ۳۲ | خطای کل |
| ۷/۳۷ | ۹/۶۶ | ۵/۹۷ | ۶/۱۱ | ۷/۰۰ | ۵/۱۸ | | ضریب تغییرات |

***، * و ns به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی دار است.

سایر ترکیب‌های تیماری بود. همچنین، تیمار F9 در روش آبیاری غرقاب کامل به‌طور معنی‌داری میزان ETR و Fv را در مقایسه با تیمار عدم‌کاربرد کود افزایش داد. همچنین، این تیمار در روش کم‌آبیاری اختلاف معنی‌داری با سایر سطوح تیمار کاربرد کود در روش آبیاری غرقاب نشان نداد که حاکی از اثر مثبت تیمار F9 بر کاهش اثر تنش کم‌آبی از طریق افزایش میزان Fv و افزایش ETR است (جدول ۱۰).

مطابق نتایج، بیشترین میزان عملکرد شلتوک معادل ۴۹۴۵ کیلوگرم در هکتار از برهمکنش تیمارهای آبیاری غرقاب کامل و F9 به‌دست آمد که در مقایسه با تیمار F1 در روش‌های

معنی‌داری بیشتر از تیمار F1 در آبیاری غرقاب کامل بود. با این وجود، بیشترین میزان کلروفیل a و a+b در روش غرقاب کامل مربوط به تیمار F7 بود که اختلاف معنی‌داری با تیمار F1 در همین روش آبیاری داشت. در همین راستا، بیشترین میزان کارتنوئید و نسبت کلروفیل a/b نیز از تیمار F7 در هر دو روش آبیاری غرقاب کامل (به‌ترتیب معادل ۲/۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ و ۴/۶) و کم‌آبیاری (معادل ۲/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ ۴/۶) به‌دست آمد. همچنین، حداکثر میزان کلروفیل b به میزان ۳/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ از تیمار F4 در آبیاری غرقاب کامل به‌دست آمد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از

جدول ۸- میانگین مربعات اثر تیمارهای کم آبیاری و کاربرد کود پتاسیمی بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل در برنج در ایستگاه سوادکوه

| میانگین مربعات | | | | | | | | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------------|
| ETR | NPQ | Y(NO) | Y(NPQ) | Fv/Fm | Fv | Fm | Fo | | |
| ۴/۶۸۹ ^{ns} | ۰/۱۰۶ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۰/۴۳۳ ^{ns} | ۰/۵۴۹ ^{ns} | ۰/۰۱۹ ^{ns} | | |
| ۱۲/۰۱۷ [*] | ۰/۲۸۳ ^{ns} | ۰/۰۰۴ [*] | ۰/۰۱۶ [*] | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۱/۳۱۲ [*] | ۱/۶۷۲ ^{ns} | ۰/۰۲۲ ^{ns} | ۱ | آبیاری (A) |
| ۰/۲۹۶ | ۰/۲۰۳ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰ | ۰/۲۴۸ | ۰/۲۱۱ | ۰/۰۰۲ | ۲ | خطای A |
| ۰/۵۴۷ ^{ns} | ۰/۰۷۳ ^{ns} | ۰/۰۰۲ ^{**} | ۰/۰۰۵ ^{**} | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۲۲۵ ^{ns} | ۰/۲۸۲ ^{ns} | ۰/۰۲۰ ^{**} | ۸ | کود پتاسیمی (B) |
| ۱/۱۹۶ [*] | ۰/۱۴۳ [*] | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۰۸ [*] | ۰/۰۰۰ ^{ns} | ۰/۰۶۹ ^{ns} | ۰/۰۷۱ [*] | ۰/۰۱۱ [*] | ۸ | B × A |
| ۰/۳۴۳ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰ | ۰/۱۴۲ | ۰/۱۵۲ | ۰/۰۰۳ | ۳۲ | خطای کل |
| ۱۰/۱۹ | ۱۳/۳۳ | ۸/۰۳ | ۱۲/۲۳ | ۱/۷۹ | ۷/۴۵ | ۶/۱۰ | ۳/۸۲ | | ضریب تغییرات |

ns و * و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی دار است.

جدول ۹- مقایسه میانگین تیمارهای آبیاری و کاربرد کودهای پتاسیمی بر میزان برخی صفات در برنج در ایستگاه آمل

| NPQ | Y(NO) | Y(NPQ) | Fv/Fm | Fv | Fm | عدد کلروفیل متر | ترکیب تیماری |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| ۱/۳۵ ^b | ۰/۱۱ ^b | ۰/۱۵ ^b | ۰/۷۴ ^a | ۴/۷۳ ^a | ۶/۰۶ ^a | ۴۵/۸۰ ^a | +۵ آبیاری |
| ۱/۵۴ ^a | ۰/۱۲ ^a | ۰/۱۶ ^a | ۰/۷۳ ^a | ۴/۴۸ ^b | ۵/۷۷ ^b | ۴۳/۵۱ ^b | -۱۰ (ارتفاع آب بر حسب cm) |
| ۱/۲۹ ^c | ۰/۱۲ ^a | ۰/۱۶ ^a | ۰/۷۳ ^a | ۴/۷۱ ^a | ۶/۰۰ ^a | ۴۳/۸۷ ^a | F1 |
| ۱/۵۵ ^{ab} | ۰/۱۱ ^a | ۰/۱۵ ^a | ۰/۷۳ ^a | ۴/۴۹ ^a | ۵/۷۸ ^a | ۴۴/۵۰ ^a | F2 |
| ۱/۳۴ ^{bc} | ۰/۱۱ ^a | ۰/۱۴ ^a | ۰/۷۴ ^a | ۴/۵۹ ^a | ۵/۸۷ ^a | ۴۵/۲۹ ^a | F3 |
| ۱/۳۲ ^{bc} | ۰/۱۲ ^a | ۰/۱۴ ^a | ۰/۷۴ ^a | ۴/۵۹ ^a | ۵/۸۸ ^a | ۴۵/۶۹ ^a | F4 |
| ۱/۵۵ ^{ab} | ۰/۱۱ ^a | ۰/۱۵ ^a | ۰/۷۴ ^a | ۴/۶۷ ^a | ۶/۰۰ ^a | ۴۶/۱۴ ^a | F5 کاربرد کود پتاسیم |
| ۱/۴۳ ^{a-c} | ۰/۱۲ ^a | ۰/۱۵ ^a | ۰/۷۳ ^a | ۴/۵۶ ^a | ۵/۸۷ ^a | ۴۵/۸۳ ^a | F6 |
| ۱/۵۲ ^{a-c} | ۰/۱۱ ^a | ۰/۱۴ ^a | ۰/۷۴ ^a | ۴/۷۲ ^a | ۶/۰۵ ^a | ۴۶/۱۱ ^a | F7 |
| ۱/۴۵ ^{a-c} | ۰/۱۱ ^a | ۰/۱۵ ^a | ۰/۷۳ ^a | ۴/۳۹ ^a | ۵/۶۶ ^a | ۴۴/۷۸ ^a | F8 |
| ۱/۵۸ ^a | ۰/۱۲ ^a | ۰/۱۴ ^a | ۰/۷۴ ^a | ۴/۷۶ ^a | ۶/۰۹ ^a | ۴۴/۱۹ ^a | F9 |

در هر ستون و در هر تیمار، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی داری در سطح پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) ندارند.

F1: شاهد، F2: ۱۰۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه، F3: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم سولفات، F4: ۱۰۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه، F5: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم کلرید، F6: کود زیستی، F7: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه به همراه کود زیستی، F8: ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه به همراه کود زیستی، F9: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه و ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت سرک

مترمکعب به دست آمد که به طور معنی داری بیشتر از سایر سطوح کاربرد کود در روش آبیاری غرقاب کامل بود. همچنین، کمترین میزان بهره‌وری آب، معادل ۰/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب

آبیاری غرقاب کامل و کم آبیاری، به ترتیب ۲۲/۸ و ۲۷/۷ درصد بیشتر بوده است. از سوی دیگر، بیشترین میزان بهره‌وری آب نیز از تیمار F9 در روش کم آبیاری، معادل ۰/۶۶ کیلوگرم بر

جدول ۱۰- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کودهای پتاسیمی بر برخی صفات فیزیولوژیک، عملکرد شلتوک و بهره‌وری مصرف آب برنج در ایستگاه آمل

| بهره‌وری مصرف آب | عملکرد شلتوک | ETR | Fo | کارتنوئید | کلروفیل a/b | کلروفیل کل | کلروفیل b | کلروفیل a | ترکیب تیماری |
|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| کیلوگرم بر متر مکعب | کیلوگرم بر هکتار | - | - | میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ | میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ | میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ | میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ | میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ | کاربرد کود پتاسیم |
| ۰/۳۸۰ ^h | ۴۰۲۵ ^{gh} | ۶/۲۶۲ ^{b-e} | ۱/۲۹۹ ^{b-e} | ۲/۴۹۱ ^{ab} | ۴/۳۱۰ ^{ab} | ۹/۷۴۵ ^{g-i} | ۱/۸۵۱ ^{gh} | ۷/۸۹۴ ^e | F1 |
| ۰/۴۲۵ ^{e-g} | ۴۵۰۶ ^{b-f} | ۶/۸۵۶ ^{a-c} | ۱/۲۹۶ ^{b-e} | ۲/۶۳۹ ^{ab} | ۴/۱۵۷ ^{ab} | ۱۱/۵۳۰ ^{ef} | ۲/۲۴۴ ^{ef} | ۹/۲۸۴ ^{b-d} | F2 |
| ۰/۴۵۱ ^{ef} | ۴۷۷۸ ^{a-c} | ۶/۶۴۱ ^{a-d} | ۱/۳۱۱ ^{a-e} | ۳/۱۵۹ ^{bc} | ۳/۹۲۹ ^{bc} | ۱۳/۱۸۱ ^{a-c} | ۲/۶۹۰ ^{b-d} | ۱۰/۴۹۰ ^{ab} | F3 |
| ۰/۴۵۷ ^{ef} | ۴۸۴۵ ^{ab} | ۷/۰۶۵ ^{ab} | ۱/۳۱۹ ^{a-d} | ۲/۴۷۷ ^c | ۲/۹۸۲ ^e | ۱۲/۹۰۰ ^{b-e} | ۳/۲۵۴ ^a | ۹/۶۵۰ ^{bc} | F4 |
| ۰/۴۴۶ ^{e-g} | ۴۷۲۷ ^{a-d} | ۶/۸۶۹ ^{a-c} | ۱/۳۴۲ ^{a-c} | ۲/۸۶۶ ^{b-d} | ۳/۸۷۳ ^{b-d} | ۱۳/۰۱۰ ^{b-d} | ۲/۶۶۷ ^{b-d} | ۱۰/۳۵۰ ^{ab} | F5 +۵ |
| ۰/۳۹۶ ^{gh} | ۴۲۰۰ ^{f-h} | ۶/۷۸۱ ^{a-c} | ۱/۳۲۰ ^{a-d} | ۳/۲۵۵ ^{ab} | ۴/۲۱۰ ^{ab} | ۱۲/۷۷۲ ^{b-e} | ۲/۴۵۱ ^{d-f} | ۱۰/۳۲۰ ^{ab} | F6 |
| ۰/۴۰۷ ^{f-h} | ۴۳۱۲ ^{e-g} | ۶/۳۲۳ ^{b-e} | ۱/۳۴۸ ^{ab} | ۲/۸۵۵ ^a | ۴/۶۶۷ ^a | ۱۲/۷۱۲ ^{b-e} | ۲/۲۴۳ ^{ef} | ۱۰/۴۷۱ ^{ab} | F7 |
| ۰/۴۳۵ ^{e-g} | ۴۶۰۸ ^{a-e} | ۶/۳۳۷ ^{a-c} | ۱/۲۹۲ ^{b-e} | ۳/۴۰۳ ^{bc} | ۳/۹۳۵ ^{bc} | ۱۴/۵۵۱ ^a | ۲/۹۴۷ ^{ab} | ۱۱/۶۰۰ ^a | F8 |
| ۰/۴۶۷ ^e | ۴۹۴۵ ^a | ۷/۸۴۹ ^a | ۱/۳۸۰ ^a | ۳/۱۳۶ ^{b-d} | ۳/۷۴۷ ^{b-d} | ۱۳/۳۵۴ ^{ab} | ۲/۸۲۰ ^{bc} | ۱۰/۵۳۲ ^{ab} | F9 |
| ۰/۵۵۸ ^d | ۳۷۱۱ ^h | ۵/۵۶۱ ^e | ۱/۲۷۳ ^{c-e} | ۲/۰۲۸ ^{ab} | ۴/۳۹۴ ^{ab} | ۹/۳۳۸ ⁱ | ۱/۷۵۳ ^h | ۶/۵۲۲ ^f | F1 |
| ۰/۶۰۰ ^{b-d} | ۴۱۵۹ ^{f-h} | ۶/۱۹۲ ^{b-e} | ۱/۲۸۴ ^{b-e} | ۲/۴۸۱ ^{ab} | ۴/۰۷۷ ^{a-c} | ۱۰/۹۴۲ ^{f-h} | ۲/۱۵۷ ^{fg} | ۸/۷۸۷ ^{c-e} | F2 |
| ۰/۶۴۴ ^{ab} | ۴۴۶۹ ^{b-f} | ۵/۵۰۰ ^e | ۱/۲۷۱ ^{c-e} | ۲/۱۸۸ ^{bc} | ۴/۶۸۸ ^a | ۹/۹۵۸ ^{g-i} | ۱/۷۵۸ ^h | ۸/۱۹۹ ^{de} | F3 |
| ۰/۶۳۸ ^{ab} | ۴۴۲۱ ^{c-f} | ۵/۶۰۸ ^e | ۱/۲۶۵ ^{de} | ۲/۳۵۲ ^e | ۳/۱۵۱ ^{de} | ۱۱/۷۳۲ ^{d-f} | ۲/۸۳۳ ^{bc} | ۸/۸۹۵ ^{c-e} | F4 |
| ۰/۶۲۷ ^{a-c} | ۴۳۴۵ ^{d-g} | ۶/۲۲۸ ^{b-e} | ۱/۳۲۲ ^{a-d} | ۲/۷۸۸ ^{b-d} | ۳/۳۸۱ ^{c-e} | ۱۱/۱۹۰ ^{fg} | ۲/۵۶۳ ^{c-e} | ۸/۶۲۶ ^{c-e} | F5 -۱۰ |
| ۰/۵۷۹ ^{cd} | ۴۰۰۵ ^{gh} | ۶/۰۴۱ ^{c-e} | ۱/۳۲۰ ^{a-d} | ۲/۶۸۳ ^{ab} | ۴/۱۴۵ ^{ab} | ۱۱/۸۱۱ ^{c-f} | ۲/۲۹۸ ^{ef} | ۹/۵۱۲ ^{b-d} | F6 |
| ۰/۶۰۳ ^{b-d} | ۴۱۸۲ ^{f-g} | ۵/۹۱۷ ^{c-e} | ۱/۳۰۲ ^{b-e} | ۲/۷۶۵ ^a | ۴/۶۷۷ ^a | ۱۲/۶۴۰ ^{b-e} | ۲/۲۲۵ ^f | ۱۰/۴۱۱ ^{ab} | F7 |
| ۰/۶۳۶ ^{ab} | ۴۴۰۸ ^{c-f} | ۵/۷۲۶ ^{de} | ۱/۲۴۲ ^e | ۲/۱۱۶ ^{bc} | ۴/۰۵۱ ^{a-c} | ۹/۵۴۸ ^{hi} | ۱/۸۹۴ ^{gh} | ۷/۶۵۴ ^e | F8 |
| ۰/۶۶۸ ^a | ۴۶۳۰ ^{a-e} | ۶/۳۰۲ ^{b-e} | ۱/۲۹۲ ^{b-e} | ۲/۶۹۹ ^{b-d} | ۴/۱۵۸ ^{ab} | ۱۱/۷۶۰ ^{c-f} | ۲/۲۸۲ ^{ef} | ۹/۴۷۴ ^{b-d} | F9 |

در هر ستون و در هر تیمار، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) ندارند.

F1: شاهد، F2: ۱۰۰٪ کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایه، F3: ۵۰٪ به‌صورت پایه و ۵۰٪ به‌صورت سرک از کود پتاسیم سولفات، F4: ۱۰۰٪ کود پتاسیم کلرید به‌صورت پایه، F5: ۵۰٪ به‌صورت پایه و ۵۰٪ به‌صورت سرک از کود پتاسیم کلرید، F6: کود زیستی، F7: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایه به‌همراه کود زیستی، F8: ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به‌صورت پایه به‌همراه کود زیستی، F9: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایه و ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به‌صورت سرک

از تیمار F1 در روش غرقاب کامل به‌دست آمد (جدول ۱۰). شیمیایی پتاسه بود. به‌طوریکه میزان عملکرد شلتوک در برهمکنش کاربرد تیمار F6 و سطوح آبیاری غرقاب کامل و کم آبیاری در ایستگاه آمل، به‌ترتیب ۴۲۰۰ و ۴۰۰۵ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد که ۴/۳ و ۷/۹ درصد، بیشتر از سطح شاهد

جدول ۱۱- مقایسه میانگین تیمارهای آبیاری و کاربرد کودهای پتاسیمی بر میزان برخی صفات در برنج در ایستگاه سوادکوه

| Y(NO) | Fv/Fm | Fv | عدد کلروفیل متر | ترکیب تیماری |
|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------------|
| ۰/۱۵ ^b | ۰/۷۹ ^a | ۵/۲۱ ^a | ۴۴/۸۶ ^a | +۵ آبیاری |
| ۰/۱۷ ^a | ۰/۷۸ ^a | ۴/۹۰ ^b | ۴۳/۸۹ ^a | -۱۰ (ارتفاع آب بر حسب سانتی‌متر) |
| ۰/۱۶ ^a | ۰/۷۸ ^a | ۴/۸۲ ^a | ۴۳/۲۰ ^b | F1 |
| ۰/۱۵ ^a | ۰/۷۹ ^a | ۴/۵۳ ^a | ۴۲/۹۰ ^b | F2 |
| ۰/۱۴ ^a | ۰/۷۹ ^a | ۴/۵۹ ^a | ۴۶/۴۸ ^a | F3 |
| ۰/۱۵ ^a | ۰/۷۹ ^a | ۴/۷۱ ^a | ۴۶/۴۲ ^a | F4 |
| ۰/۱۶ ^a | ۰/۷۸ ^a | ۴/۵۷ ^a | ۴۴/۷۳ ^{ab} | F5 کاربرد کود پتاسیم |
| ۰/۱۷ ^a | ۰/۷۷ ^a | ۴/۶۶ ^a | ۴۴/۴۷ ^{ab} | F6 |
| ۰/۱۶ ^a | ۰/۷۸ ^a | ۴/۴۹ ^a | ۴۳/۸۲ ^{ab} | F7 |
| ۰/۱۷ ^a | ۰/۷۹ ^a | ۴/۴۵ ^a | ۴۳/۴۰ ^b | F8 |
| ۰/۱۴ ^a | ۰/۸۰ ^a | ۴/۷۶ ^a | ۴۳/۹۵ ^{ab} | F9 |

در هر ستون و در هر تیمار، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) ندارند.

F1: شاهد، F2: ۱۰۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه، F3: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم سولفات، F4: ۱۰۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه، F5: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم کلرید، F6: کود زیستی، F7: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه به همراه کود زیستی، F8: ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه به همراه کود زیستی، F9: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه و ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت سرک

براساس یافته‌ها، برهمکنش تیمار آبیاری غرقاب کامل و F4، بیشترین تأثیر را بر میزان کلروفیل a نشان داد و موجب افزایش ۲۲/۵ درصدی آن در مقایسه با تیمار F1 در آبیاری غرقاب کامل گردید. همچنین، بیشترین میزان کلروفیل b و کلروفیل کل از برهمکنش تیمارهای آبیاری غرقابی و F9، به ترتیب به میزان ۲/۱ و ۱۳/۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ حاصل شد که به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار F1 در آبیاری غرقاب و کلیه سطوح کاربرد کود پتاسیمی در روش کم‌آبیاری بود. بر همین راستا، بیشترین میزان کلروفیل b و کلروفیل کل در روش کم‌آبیاری، مربوط به همین سطح کاربرد کود پتاسیمی بود که برتری معنی‌داری نسبت به تیمار F1 در آبیاری غرقاب کامل داشت. از سوی دیگر، بیشترین میزان نسبت کلروفیل a/b و کارتنوئید مربوط به تیمار F3، به ترتیب در روش کم‌آبیاری و روش غرقاب کامل بود که معادل ۷/۲۳ و ۳/۴۴ میلی‌گرم بر

و ۱۷/۷ و ۱۵/۶ درصد کمتر از سطح F9 بود (جدول ۱۰).
ایستگاه مزرعه الگوی سوادکوه: براساس نتایج، میزان Fv با اعمال تیمار کم‌آبیاری در مقایسه با تیمار آبیاری غرقاب به طور معنی‌داری کاهش یافت. میزان این صفت در تیمار کم‌آبیاری ۶/۳ درصد کمتر از روش آبیاری غرقاب بود. از سوی دیگر، میزان Y(NO) در تیمار کم‌آبیاری به طور معنی‌داری افزایش یافت، به طوری که میزان آن ۱۳/۳ درصد بیشتر از تیمار آبیاری غرقاب بود. همچنین، از لحاظ میزان صفات عدد کلروفیل متر و میزان Fv/Fm، بین تیمار کم‌آبیاری و آبیاری غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. سطوح مختلف تیمار کاربرد کود پتاسیمی بر میزان صفات Fv، Fv/Fm و Y(NO) اثر معنی‌داری نداشت. اما میزان عدد کلروفیل متر در تیمارهای F4 و F3 به ترتیب معادل ۴۶/۴۲ و ۴۶/۴۸ بوده که به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار F1 بوده است (جدول ۱۱).

جدول ۱۲- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کودهای پتاسیمی بر برخی صفات فیزیولوژیک، عملکرد شلنوک و بهره‌وری آب برنج در ایستگاه سوادکوه

| Fo | کارتنوئید | کلروفیل a/b | کلروفیل کل | کلروفیل b | کلروفیل a | ترکیب تیماری | |
|-----------|-----------|-------------|----------------------------|-----------|------------|-------------------|-----------------------|
| | | | | | | کاربرد کود پتاسیم | ارتفاع آب (سانتی‌متر) |
| - | | | میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ | | | | |
| ۱/۳۷۸ a-c | ۲/۸۵۱ b-e | ۵/۹۳۲ b-e | ۱۱/۰۷۱ d-f | ۱/۶۰۱ f | ۹/۴۷۲ ef | F1 | |
| ۱/۳۳۶ a-d | ۲/۸۵۱ b-e | ۵/۵۳۲ c-f | ۱۱/۹۶۳ b-e | ۱/۸۳۰ c | ۱۰/۱۳۰ b-f | F2 | |
| ۱/۲۶۹ d-f | ۳/۴۴۰ a | ۵/۹۷۵ b-e | ۱۲/۰۸۰ b-d | ۱/۹۴۵ a-c | ۱۰/۷۶۲ a-d | F3 | |
| ۱/۲۸۹ c-f | ۳/۰۷۶ a-e | ۵/۲۷۹ ef | ۱۲/۸۰۰ ab | ۲/۰۳۹ ab | ۱۱/۶۱۱ a | F4 | |
| ۱/۳۵۰ a-d | ۲/۹۱۷ b-e | ۵/۴۴۰ d-f | ۱۲/۱۴۴ b-d | ۱/۸۹۰ bc | ۱۰/۲۴۱ b-f | F5 | +۵ |
| ۱/۳۸۰ ab | ۳/۲۸۴ a-c | ۵/۳۳۰ ef | ۱۲/۷۷۲ ab | ۲/۰۳۸ ab | ۱۰/۸۳۳ a-d | F6 | |
| ۱/۳۸۵ ab | ۳/۱۸۳ a-d | ۵/۰۸۷ ef | ۱۲/۵۴۱ a-c | ۲/۰۶۱ ab | ۱۰/۴۸۰ a-e | F7 | |
| ۱/۲۶۲ d-f | ۳/۱۴۵ a-d | ۵/۶۰۰ c-f | ۱۲/۷۸۱ ab | ۱/۹۴۳ a-c | ۱۰/۸۴۲ a-c | F8 | |
| ۱/۴۰۲ a | ۲/۹۲۲ b-e | ۴/۸۰۳ f | ۱۳/۵۶۰ a | ۲/۰۸۳ a | ۱۰/۰۰۰ b-f | F9 | |
| ۱/۲۴۱ ef | ۲/۵۸۸ ef | ۶/۲۸۷ b-d | ۱۰/۸۵۱ ef | ۱/۴۸۸ f | ۹/۱۵۴ f | F1 | |
| ۱/۳۰۰ a-f | ۲/۸۰۴ c-f | ۶/۸۳۱ b | ۱۰/۷۴۰ f | ۱/۴۲۳ f | ۹/۶۴۷ d-f | F2 | |
| ۱/۳۱۳ a-e | ۳/۳۳۴ ab | ۷/۲۳۱ a | ۱۱/۴۷۱ c-f | ۱/۶۴۰ d-f | ۹/۸۲۳ c-f | F3 | |
| ۱/۲۳۵ ef | ۳/۰۱۸ a-e | ۵/۴۴۱ d-f | ۱۱/۶۳۴ b-f | ۱/۸۰۳ c-e | ۱۱/۱۵۵ ab | F4 | |
| ۱/۲۶۲ d-f | ۲/۶۳۷ ef | ۵/۰۹۲ ef | ۱۰/۹۶۱ d-f | ۱/۸۰۸ cd | ۹/۳۵۸ ef | F5 | -۱۰ |
| ۱/۳۸۰ ab | ۲/۹۹۲ a-e | ۶/۴۴۰ bc | ۱۱/۴۶۹ c-f | ۱/۵۴۵ f | ۹/۹۱۳ c-f | F6 | |
| ۱/۳۶۲ abc | ۲/۷۸۹ c-f | ۵/۲۷۰ ef | ۱۲/۳۵۲ bc | ۱/۸۷۰ bc | ۱۰/۳۸۱ b-e | F7 | |
| ۱/۲۱۲ f | ۲/۷۵۵ d-f | ۵/۹۲۴ b-e | ۱۱/۱۵۰ d-f | ۱/۶۲۳ ef | ۹/۵۲۸ ef | F8 | |
| ۱/۳۸۲ ab | ۲/۳۳۳ f | ۵/۰۹۱ ef | ۱۲/۷۹۳ ab | ۱/۸۸۲ bc | ۹/۵۸۹ d-f | F9 | |

در هر ستون و در هر تیمار، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) ندارند.

F1: شاهد، F2: ۱۰۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه، F3: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم سولفات، F4: ۱۰۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه، F5: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم کلرید، F6: کود زیستی، F7: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه به همراه کود زیستی، F8: ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه به همراه کود زیستی، F9: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه و ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت سرک

روش کم‌آبیاری بود. براساس نتایج، میزان Y(NPQ) و میزان NPQ در تیمار کم‌آبیاری در مقایسه با روش غرقاب کامل افزایش یافت، به طوری که بیشترین میزان صفات یادشده به ترتیب معادل ۰/۳ و ۱/۸۳ از برهمکنش تیمارهای F1 و روش کم‌آبیاری و تیمارهای F9 در آبیاری کاهش یافته حاصل

گرم وزن تر برگ به دست آمد (جدول ۱۲). بیشترین میزان Fo، Fm و ETR از ترکیب تیماری F9 و روش غرقاب کامل به دست آمد. در همین راستا، بیشترین میزان صفات یادشده در کم‌آبیاری نیز از همین سطح کاربرد کود پتاسیمی حاصل شده که به ترتیب ۱۱/۳، ۵/۳ و ۱۹/۲ درصد بیشتر از تیمار F1 در

| بهره‌وری مصرف آب | عملکرد شلتوک | ETR | NPQ | Y(NPQ) | Fm | ترکیب تیماری | |
|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| کیلوگرم بر مترمکعب | کیلوگرم بر هکتار | - | - | - | - | کاربرد کود پتاسیم | ارتفاع آب (سانتی‌متر) |
| ۰/۴۸۰ ⁱ | ۳۸۱۳ ^{gh} | ۶/۰۵۷ ^{a-d} | ۱/۴۷۸ ^{b-d} | ۰/۱۸۴ ^{c-e} | ۶/۷۱۵ ^{a-c} | F1 | |
| ۰/۵۴۱ ^{f-g} | ۴۳۰۲ ^{c-f} | ۶/۴۰۰ ^{a-c} | ۱/۳۳۶ ^{cd} | ۰/۱۸۴ ^{c-e} | ۶/۷۳۲ ^{a-c} | F2 | |
| ۰/۵۷۹ ^{ef} | ۴۶۰۲ ^{a-c} | ۵/۹۸۷ ^{a-e} | ۱/۲۸۶ ^{cd} | ۰/۱۹۰ ^{c-e} | ۶/۶۱۴ ^{a-d} | F3 | |
| ۰/۵۹۰ ^{ef} | ۴۶۸۹ ^{ab} | ۶/۵۲۵ ^{ab} | ۱/۵۶۶ ^{a-c} | ۰/۱۸۱ ^{c-e} | ۶/۲۴۸ ^{b-e} | F4 | |
| ۰/۵۶۷ ^{e-g} | ۴۵۰۹ ^{a-d} | ۶/۳۲۹ ^{a-c} | ۱/۳۹۶ ^{b-d} | ۰/۲۰۴ ^{b-d} | ۶/۷۶۴ ^{ab} | F5 | +۵ |
| ۰/۵۰۲ ^{hi} | ۳۹۸۲ ^{f-h} | ۶/۱۴۳ ^{a-d} | ۱/۲۳۱ ^d | ۰/۱۸۱ ^{c-e} | ۶/۳۵۶ ^{b-e} | F6 | |
| ۰/۵۲۴ ^{g-i} | ۴۱۶۴ ^{d-g} | ۵/۶۳۵ ^{b-f} | ۱/۴۰۵ ^{b-d} | ۰/۱۹۹ ^{b-d} | ۶/۴۷۶ ^{a-e} | F7 | |
| ۰/۵۶۱ ^{e-g} | ۴۴۶۰ ^{a-e} | ۶/۰۴۹ ^{a-d} | ۱/۵۵۱ ^{a-d} | ۰/۱۵۶ ^{de} | ۶/۰۴۹ ^{de} | F8 | |
| ۰/۶۰۱ ^e | ۴۷۷۰ ^a | ۶/۸۱۳ ^a | ۱/۴۱۵ ^{b-d} | ۰/۱۴۵ ^e | ۷/۰۳۷ ^a | F9 | |
| ۰/۷۰۴ ^d | ۳۶۵۹ ^h | ۴/۸۴۱ ^e | ۱/۳۰۵ ^{cd} | ۰/۳۰۵ ^a | ۶/۱۰۵ ^{c-e} | F1 | |
| ۰/۷۶۴ ^{bc} | ۳۹۷۳ ^{f-h} | ۵/۵۳۸ ^{c-f} | ۱/۴۶۷ ^{b-d} | ۰/۲۲۳ ^{bc} | ۶/۲۸۸ ^{b-e} | F2 | |
| ۰/۸۲۹ ^a | ۴۳۱۳ ^{b-f} | ۴/۸۴۶ ^f | ۱/۴۳۰ ^{b-d} | ۰/۲۵۰ ^b | ۶/۲۷۰ ^{b-e} | F3 | |
| ۰/۸۱۲ ^{ab} | ۴۲۲۳ ^{c-f} | ۵/۰۶۸ ^{ef} | ۱/۴۵۶ ^{b-d} | ۰/۲۱۵ ^{bc} | ۶/۲۵۱ ^{b-e} | F4 | |
| ۰/۷۹۴ ^{ab} | ۴۱۲۷ ^{e-g} | ۵/۷۶۲ ^{b-f} | ۱/۶۸۵ ^{ab} | ۰/۲۱۴ ^{bc} | ۶/۳۳۰ ^{b-e} | F5 | -۱۰ |
| ۰/۷۲۸ ^{cd} | ۳۷۸۷ ^{gh} | ۵/۳۵۳ ^{d-f} | ۱/۶۷۹ ^{ab} | ۰/۲۱۹ ^{ab} | ۶/۰۸۷ ^{c-e} | F6 | |
| ۰/۷۷۶ ^{bc} | ۴۰۳۴ ^{f-h} | ۵/۲۲۹ ^{d-f} | ۱/۵۹۴ ^{a-c} | ۰/۲۰۲ ^{b-d} | ۶/۱۷۸ ^{b-e} | F7 | |
| ۰/۸۱۵ ^{ab} | ۴۲۳۳ ^{c-f} | ۵/۰۳۸ ^{ef} | ۱/۵۱۸ ^{a-d} | ۰/۱۵۳ ^{de} | ۵/۸۸۳ ^e | F8 | |
| ۰/۸۳۱ ^a | ۴۳۲۲ ^{b-f} | ۵/۷۷۲ ^{b-f} | ۱/۸۳۲ ^a | ۰/۱۵۷ ^{de} | ۶/۴۳۰ ^{a-c} | F9 | |

در هر ستون و در هر تیمار، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) ندارند.

F1: شاهد، F2: ۱۰۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه، F3: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم سولفات، F4: ۱۰۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه، F5: ۵۰٪ به صورت پایه و ۵۰٪ به صورت سرک از کود پتاسیم کلرید، F6: کود زیستی، F7: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه به همراه کود زیستی، F8: ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت پایه به همراه کود زیستی، F9: ۵۰٪ کود پتاسیم سولفات به صورت پایه و ۵۰٪ کود پتاسیم کلرید به صورت سرک

شد (جدول ۱۲).

۳۰/۳ درصد بیشتر بوده است. از سوی دیگر، بیشترین میزان بهره‌وری آب نیز از برهمکنش تیمارهای F9 در روش کم‌آبیاری، معادل ۰/۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب، به دست آمد که به طور معنی‌داری بیشتر از سایر سطوح کاربرد کود در آبیاری غرقاب کامل بود. همچنین، کمترین میزان بهره‌وری آب معادل

براساس یافته‌ها، بیشترین میزان عملکرد شلتوک معادل ۴۷۷۰ کیلوگرم در هکتار مربوط به ترکیب تیماری آبیاری غرقاب کامل و F9 به دست آمد که در مقایسه با تیمار F1 در روش‌های آبیاری غرقاب کامل و کم‌آبیاری به ترتیب ۲۵/۱ و

جدول ۱۳- همبستگی عملکرد شلتوک با صفات بهره‌وری آب، کلروفیل a و کل، کارایی کوانتومی فتوسیستم II و سرعت انتقال الکترون در فتوسیستم II در پاسخ به تیمارهای آبیاری و کاربرد کودهای پتاسیمی در ایستگاه‌های آمل و سوادکوه (n=۱۸)

| ETR | Fv/Fm | کلروفیل کل | کلروفیل a | بهره‌وری آب | ایستگاه آمل | عملکرد |
|----------|----------|------------|-----------|-------------|-----------------|--------|
| ۰/۶۰۰ ** | ۰/۴۶۷ * | ۰/۵۳۸ * | ۰/۴۹۶ * | -۰/۱۶۹ ns | ایستگاه آمل | عملکرد |
| ۰/۵۲۳ * | ۰/۶۱۳ ** | ۰/۵۸۰ * | ۰/۵۰۹ * | -۰/۱۷۱ ns | ایستگاه سوادکوه | شلتوک |

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و ns، غیر معنی‌دار

موجب تعرق کمتر گیاه، کاهش تبخیر از سطح خاک (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹) و حفظ فعالیت رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش شد. در همین راستا، میزان کاهش محتوی کلروفیل a، b، a+b و کارتنوئید در ایستگاه سوادکوه در مقایسه با ایستگاه آمل در پاسخ به تیمار کم‌آبیاری، کمتر بود. بر همین اساس، میزان کلروفیل a در تیمار عدم‌کاربرد کود در روش کم‌آبیاری در ایستگاه سوادکوه کاهش غیرمعنی‌داری (معادل ۳/۴ درصد) در مقایسه با تیمار عدم‌کاربرد کود در روش غرقاب کامل داشت، اما این کاهش در ایستگاه آمل معنی‌دار و معادل ۲۱ درصد بود.

نتایج سایر پژوهشگران نیز حاکی از کاهش میزان عدد کلروفیل‌متر، رنگیزه‌های کلروفیل و کارتنوئید تحت تیمار کم‌آبیاری است (آقاجانی دل‌اور، ۱۳۹۵؛ کاظمی، ۱۳۹۵). آنها گزارش کردند که کاهش عدد کلروفیل‌متر و کاهش سبزیگی گیاه ممکن است به علت تخریب کلروفیل در اثر تنش باشد که منجر به کاهش میزان کلروفیل و کاهش فتوسنتز خالص می‌شود (Johnson et al., 2002). یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش کلروفیل، تخریب آنها توسط گونه‌های فعال اکسیژن است. بر این اساس، کاهش فعالیت فتوسیستم II، کاهش فعالیت آنزیم رویسکو و مهار سنتز ATP، موجب تشکیل گونه‌های اکسیژن آزاد در کلروپلاست‌ها می‌گردند (Lawlor and Cornic, 2002). با این وجود، پژوهشگران اظهار داشتند که محتوای نسبی کلروفیل به تنهایی نمی‌تواند برآورد درستی از عملکرد گیاه را نشان دهد، بلکه توان فتوسنتزی برگ پرچم قبل از گرده‌افشانی، همچنین توان ذخیره‌سازی مواد پرورده و قابلیت انتقال مجدد آنها به مخازن فیزیولوژیک نیز حائز اهمیت است (نیک‌نژاد و

۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب، از تیمار FI در روش غرقاب کامل حاصل شد (جدول ۱۲).

مشابه نتایج به‌دست آمده در ایستگاه آمل، کود زیستی مورد استفاده در ایستگاه سوادکوه اثر معنی‌داری بر صفاتی نظیر عملکرد شلتوک و بهره‌وری مصرف آب در مقایسه با سطح FI نداشت. میزان عملکرد شلتوک حاصل از برهمکنش کاربرد تیمار کود زیستی و سطوح آبیاری غرقاب کامل و کم‌آبیاری در ایستگاه آمل به ترتیب ۳۹۸۲ و ۳۷۸۷ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که ۴/۴ و ۳/۵ درصد بیشتر از سطح FI و ۱۹/۷ و ۱۴/۱ درصد کمتر از سطح F9 بود (جدول ۱۲).

نتایج همبستگی صفات حاکی از ارتباط مثبت و معنی‌دار عملکرد شلتوک و صفات محتوی کلروفیل a، کلروفیل کل، Fv/Fm و ETR در هر دو ایستگاه بود. با این وجود، همبستگی عملکرد شلتوک و بهره‌وری مصرف آب منفی و غیرمعنی‌دار بود (جدول ۱۳).

بحث

براساس یافته‌ها، میزان عدد کلروفیل‌متر در ایستگاه آمل تحت تأثیر تیمار کم‌آبی کاهش یافت. همچنین نتایج برهمکنش تیمارها، حاکی از کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش نسبت کلروفیل a/b در همه سطوح تیمار کاربرد کود در روش کم‌آبیاری در مقایسه با سطوح مشابه کاربرد کود در آبیاری غرقاب کامل بود اگرچه این کاهش برای بعضی سطوح کودی غیرمعنی‌دار بود. کاهش غیرمعنی‌دار عدد کلروفیل‌متر در ایستگاه سوادکوه را شاید بتوان به کم‌تر بودن میانگین درجه حرارت و مجموع ساعات آفتابی مرتبط دانست (جدول ۱) که

کاهش میزان F_v و F_m در ایستگاه آمل و کاهش F_v در ایستگاه سوادکوه تحت تنش کم‌آبیاری پیش‌تر برای برنج (آقاجانی دلاور، ۱۳۹۵) و گندم (Zlatev et al., 2009) گزارش شده بود. با کاهش F_m تحت شرایط محدودیت آبی، اختلاف بین F_o و F_m ، یعنی F_v ، کاهش پیدا می‌کند. کاهش F_v نشان‌دهنده عملکرد نامناسب سازوکار فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش و کاهش سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی است (Baker and Roosenqvist, 2004). از سوی دیگر، گیاه پس از قرارگیری در شرایط تنش و به‌منظور حفظ کارایی کوانتومی در فتوسیستم II (Zlatev and Yordanov, 2004)، میزان F_o خود را کاهش داد. کاهش میزان F_o بدین معناست که تثبیت کربن یا به عبارتی انتقال الکترون سریع‌تر آغاز شده است (Andrews et al., 1995).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با اعمال تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد کودهای پتاسیمی، تغییری در نسبت F_v/F_m مشاهده نشد. به‌عبارتی، قابلیت فتوسیستم II برای انجام فرآیندهای اولیه فتوشیمیایی تحت تأثیر تنش آبی حاصل از کم‌آبیاری قرار نگرفت. این نتایج با یافته‌های Shangguan و همکاران (۲۰۰۰) همخوانی دارد که با بررسی گندم زمستانه تحت تنش، تغییری در نسبت F_v/F_m مشاهده نکردند. در همین راستا، پژوهشگران گزارش کردند که نسبت F_v/F_m به میزان ۰/۸۵ در شرایط بدون تنش به‌دست می‌آید و مقادیر کمتر از ۰/۸۵ حاکی از وجود انواع تنش‌های زنده و غیرزنده روی گیاهان است (Kalaji and Guo, 2008). از آنجا که در پژوهش حاضر در هر دو ایستگاه، نسبت F_v/F_m حتی در گیاهان شاهد که در وضعیت آبی مناسبی بودند، کمتر از ۰/۸۵ به‌دست آمد، بنابراین می‌توان تأثیر برخی شرایط نامناسب کشت نظیر بالا بودن اسیدیته اشباع خاک در هر دو ایستگاه و هدایت الکتریکی خاک در ایستگاه آمل (جدول ۲)، بر گیاه را محتمل دانست. در همین راستا، اسیدیته اشباع خاک مناسب جهت کشت برنج به‌ویژه در خزانه، پنج تا شش گزارش شده است (عرفانی، ۱۳۹۵). همچنین، گزارش شد که با افزایش میزان هدایت الکتریکی به دو دسی‌زیمنس بر متر، میزان عملکرد گیاه

امام، ۱۳۹۰). به‌طور کلی می‌توان عنوان نمود که حفظ غلظت کلروفیل در شرایط دشوار محیطی، به ثبات فتوستتیز در این شرایط کمک کرده و سبب کاهش خسارت‌های وارده به گیاه در تنش‌های محیطی می‌گردد. از سوی دیگر، گزارش گردیده است که کارتنوئیدها نقش مهمی در دفاع آنتی‌اکسیدانی ایفا می‌کنند، به‌گونه‌ای که گیاهان دارای محتوی کارتنوئید بالاتر، دفاع مؤثرتری در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از تنش آب، خواهند داشت (نعمت‌اللهی و همکاران، ۱۳۹۲). این نتایج با نتایج پژوهش حاضر در هر دو ایستگاه مطابقت ندارد که ممکن است نشان از عدم‌وقوع تنش شدید خشکی در هر دو ایستگاه باشد. همچنین، پژوهشگران افزایش نسبت کلروفیل a/b در شرایط تنش خشکی را گزارش کردند (کاظمی، ۱۳۹۵) که با نتایج این پژوهش در هر دو ایستگاه مطابقت دارد. آنها علت این افزایش را کاهش بیشتر غلظت کلروفیل b در مقایسه با کلروفیل a دانستند که چنین رابطه‌ای در تحقیق حاضر نیز مشاهده شد.

همچنین، نتایج این پژوهش حاکی از اثر مثبت کاربرد کود پتاسیمی بر میزان رنگیزه‌های فتوستتیزی در هر دو ایستگاه و عدد کلروفیل‌متر در ایستگاه سوادکوه بود. افزایش محتوی کلروفیل در گیاه برنج تحت تأثیر کاربرد کود پتاسیمی پیش‌تر نیز گزارش شده بود (Liu et al., 2013). نتایج پژوهش عباسی‌مقدم و شبان (۱۳۹۳) نیز نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش و کاربرد کود پتاسیمی سبب افزایش میزان کلروفیل در همه مراحل رشد گل‌رنگ گردید. از آنجایی‌که میزان کلروفیل با فراهمی کودها در ارتباط است (ملکوتی و همایی، ۱۳۸۳)، به‌نظر می‌رسد که در تیمارهای مصرف کود پتاسیم، مواد لازم جهت ساخت کلروفیل بیشتر در اختیار گیاه بوده و میزان کلروفیل در آنها بیشتر از تیمارهای عدم‌مصرف این کودها است (مؤمنی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین گزارش گردید که پتاسیم با بهبود هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش و ممانعت از تجزیه کلروفیل توسط تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌تواند نقش مؤثری در افزایش محتوی کلروفیل در شرایط تنش داشته باشد (علوی‌متین و همکاران، ۱۳۹۴).

(به صورت پایه) و پتاسیم کلرید (به صورت سرک)، در مقایسه با تیمار عدم کاربرد کود به طور معنی داری افزایش یافت. پژوهشگرانی نظیر Mohd Zain و Ismail (۲۰۱۶) با اشاره به اینکه تا پیش از آنها پژوهشی روی اثرات کاربرد کودهای پتاسیم سولفات و پتاسیم کلرید بر تنش کم آبی در برنج صورت نگرفته، گزارش نمودند که کاربرد این کودها می تواند اثرات منفی تیمارهای کم آبیاری در برنج را کاهش دهد. در همین راستا، گزارش گردید فراهمی پتاسیم می تواند سبب افزایش تثبیت دی اکسید کربن در سامانه فتوسنتزی و افزایش تولید ترکیبات کربوهیدراتی و در نهایت مانع افزایش آسیب اکسیداتیو نوری در کلروپلاست شود (Liu et al., 2013). همچنین در پژوهشی مشابه، نقش محافظتی پتاسیم در گیاهان تحت تنش، حفظ pH بالا در استرومای کلروپلاست و ممانعت از آسیب های اکسیداتیو نوری در کلروپلاست گزارش گردید (Cakmak, 1997).

یافته های پژوهش حاضر نشان داد که میزان Y(NPQ) با اعمال تیمار کم آبی افزایش می یابد که با یافته های کاظمی (۱۳۹۵) در گیاه ذرت و لی و همکاران (Li et al., 2008) در گیاه خیار نیز همخوانی دارد. با این وجود، کاربرد تیمارهای کود پتاسیمی در ایستگاه سوادکوه مانع از افزایش معنی دار این شاخص در روش کم آبیاری در مقایسه با روش غرقاب کامل شد. شاخص Y(NO) نیز تحت تنش کم آبی افزایش یافت. وقوع بازدارندگی نوری سبب افزایش میزان این شاخص می گردد (Yaghoubian et al., 2016). از سوی دیگر، کاهش میزان ETR در تیمار کم آبیاری مشاهده شد. در همین راستا، Baker و Roosenqvist (۲۰۰۴) گزارش کردند که بسته شدن روزنه ها و کاهش فتوسنتز در شرایط تنش، منجر به کاهش کارایی کربوکسیلاسیون، کاهش سرعت بازسازی آنزیم رویسکو، کاهش فراهمی دی اکسید کربن از روزنه ها و یا کاهش انتقال کربوهیدرات ها به خارج از سلول مزوفیل شده و در نتیجه باعث کاهش سرعت مصرف ATP و NADPH در چرخه کالوین می شود. این موضوع در نهایت باعث کاهش ETR، کاهش Fm و کاهش Fv می شود.

برنج ۲۳ تا ۴۱ درصد کاهش می یابد (Motamed et al., 2008). شاید تفاوت در میزان هدایت الکتریکی خاک در دو ایستگاه (جدول ۲)، یکی از دلایل پایین تر بودن نسبت Fv/Fm در ایستگاه آمل در مقایسه با ایستگاه سوادکوه باشد.

گزارش شده است که هر چه اثر تخریبی تنش محیطی بر گیاه بیشتر باشد، از مقدار نسبت Fv/Fm به میزان بیشتری نسبت به شرایط مساعد فتوسنتزی کاسته می شود (قدمی فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۹۴). کاهش در این نسبت ممکن است به دلیل توسعه آهسته فرایندهای خاموشی فتوشیمیایی و آسیب نوری به مراکز واکنش باشد که هر دوی آنها منجر به کاهش کارایی کوانتومی فتوشیمیایی فتوسیستم II می گردند (Baker and Roosenqvist, 2004). با این وجود، Gale و همکاران (۲۰۰۲) نتایج متفاوتی ارائه نمودند که با یافته های پژوهش حاضر مطابقت دارد. آنها با اعمال تنش خشکی در کشت گلدانی گیاه گندم مشاهده کردند که تغییری در نسبت Fv/Fm برگ های سازگار شده به تاریکی ایجاد نشد و نتیجه گرفتند که در طی تنش، Fv/Fm کاهش نمی یابد. به نظر می رسد در این پژوهش، با وجود اینکه تیمار کم آبیاری تأثیر کاهشی بر میزان Fv و Fm داشته، اما گیاهچه ها توانسته اند کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II را حتی در شرایط عدم کاربرد کود پتاسیمی، حفظ و به خوبی فعالیت های فتوسنتزی خود را انجام دهند. شاید یکی از دلایل آن، افزایش میزان NPQ تحت شرایط کم آبی و اعمال تیمارهای کاربرد کود پتاسیمی باشد. این شاخص در واقع شاخص مربوط به هدررفت گرمایی است و گستره معمول آن برای گیاه بین ۰/۵ تا ۳/۵ است (Chaves et al., 2003) که در پژوهش حاضر از ۱/۲۳ تا ۱/۸۳ متغیر بود. افزایش در مقدار این شاخص نشان دهنده ظرفیت بالای چرخه گزانتوفیل و توانایی گیاه در دفع تنش از طریق هدر دادن انرژی به صورت گرما است (Yaghoubian et al., 2016). افزایش این شاخص تحت تنش در ذرت (کاظمی، ۱۳۹۵) و گندم (Abdeshahian et al., 2010) پیش تر گزارش شده بود.

از سوی دیگر، میزان Fv/Fm تحت تأثیر کاربرد کود پتاسیمی، به ویژه تیمار کاربرد توأم کودهای پتاسیم سولفات

پتاسیم را شامل افزایش تعداد خوشه‌چه، کاهش درصد دانه‌های پوک در خوشه (Marschner, 1995)، افزایش سطح برگ (Mohd Zain and Ismail, 2016) دانستند. از لحاظ فیزیولوژیکی نیز، دلایلی نظیر کنترل تعادل یونی، افزایش فعالیت برخی آنزیم‌ها مانند ADP-گلوكز سینتاز، تأثیر بر افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه (Reddy et al., 2004)، بهبود هدایت روزنه‌ای (Umar, 2006)، تنظیم اسمزی (Mohd Zain and Ismail, 2016)، افزایش میزان کلروفیل و رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت‌های فتوسنتزی و در نهایت انتقال ترکیبات حاصل از فتوسنتز دانستند (Marchiol et al., 1996).

یافته‌های پژوهش حاضر در خصوص افزایش بهره‌وری مصرف آب با کاهش میزان آبیاری، با نتایج آقاجانی دلاور (۱۳۹۵) مطابقت دارد. با این وجود، Abbasi and Sepaskhah (۲۰۱۱) گزارش نمودند که بهره‌وری مصرف آب در تیمارهای کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای غرقاب کامل برای ارقام مختلف برنج در استان فارس بود. ریائی و همکاران (۱۳۹۲) نیز بهترین تیمار آبیاری برنج را تیمار غرقاب کامل با پنج سانتی‌متر ارتفاع آب از سطح خاک دانستند. همچنین مطابق نتایج، کاربرد تیمارهای کود پتاسیمی نیز موجب افزایش معنی‌دار بهره‌وری مصرف آب گردید. افزایش بهره‌وری مصرف آب با کاربرد کود پتاسیم پیش‌تر هم گزارش شده بود (Rehm and Schmitt, 2002) که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. در همین راستا، کریمی و همکاران (۱۳۸۵) افزایش بهره‌وری مصرف آب را مرتبط با مصرف بهینه کود دانستند. پتاسیم از طریق افزایش بهره‌وری مصرف آب، موجب القای مقاومت در گیاهان تحت شرایط کم‌آبی نیز می‌شود. این اثر مثبت پتاسیم به‌دلیل تأثیر آن بر رشد ریشه (Bhiah et al., 2010) همراه با افزایش جذب عناصر غذایی و آب به‌وسیله گیاه است (Mohd Zain and Ismail, 2016).

براساس یافته‌ها، کود زیستی اثر معنی‌داری بر صفاتی نظیر کارایی کوانتومی فتوسیستم II، عدد کلروفیل‌متر، عملکرد شلتوک و بهره‌وری مصرف آب نداشت. یکی از دلایل عدم تأثیرگذاری کودهای زیستی تجاری، ممکن است عدم‌سازگاری

مطابق نتایج، میزان عملکرد شلتوک با کاهش میزان آبیاری در هر دو ایستگاه، کاهش یافت. این نتایج توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده بود (آقاجانی دلاور، ۱۳۹۵؛ Pirdashti et al., 2004). در همین راستا، فرخی‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) گزارش کردند که تنش خشکی در گیاه با کاهش آب برگ و در نتیجه بسته‌شدن روزنه‌ها و افت فتوسنتز از یک سو و اثر بر فعالیت‌های آنزیمی و فرآیندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت عملکرد دانه از طریق کاهش اجزای عملکرد می‌شود. از سوی دیگر، کاهش تنش سرمایی در شب به‌دلیل تثبیت دمای خاک توسط آب سطحی و همچنین، افزایش راندمان مصرف کود و جذب بهتر آن توسط گیاه را می‌توان از دیگر عوامل مؤثر بر افزایش عملکرد در حالت غرقاب کامل دانست (یوسفیان، ۱۳۸۹). همچنین، Rad و همکاران (۲۰۱۲) نیز کاهش عملکرد دانه تحت رژیم کم‌آبیاری را به افزایش درصد پوکی شلتوک در خوشه مربوط دانستند. از سوی دیگر، کاهش بیشتر عملکرد شلتوک از حدود ۴/۲ درصد در ایستگاه سوادکوه به ۸/۴ درصد در ایستگاه آمل در تیمار شاهد (عدم کاربرد کود پتاسیمی) در روش کم‌آبیاری در مقایسه با روش غرقاب کامل را می‌توان به تفاوت‌های اقلیمی مانند کاهش حدود سه و نیم برابری میزان بارندگی و افزایش ۱۶/۲ درصدی متوسط درجه حرارت در طول فصل رشد برنج در ایستگاه آمل (جدول ۱) دانست که منجر به افزایش میزان تبخیر آب و در نهایت کاهش بیشتر عملکرد شد. با این وجود، میزان عملکرد شلتوک در آمل بیشتر از ایستگاه سوادکوه بود. به‌نظر می‌رسد کم‌بودن مجموع ساعات آفتابی در طول فصل رشد در ایستگاه سوادکوه (جدول ۱) مانعی جهت دستیابی به عملکرد بهینه در این پژوهش، با وجود کارایی بالاتر سامانه فتوشیمیایی فتوسیستم II در مقایسه با ایستگاه آمل بود.

افزایش عملکرد شلتوک با کاربرد کود پتاسیمی در برنج پیش‌تر گزارش شده بود (Zaman et al., 2015) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. همچنین، Pervez و همکاران (۲۰۰۴) این افزایش را در شرایط تنش کم‌آبی نیز گزارش کردند. پژوهشگران دلایل افزایش عملکرد در پاسخ به کاربرد کود

نشان‌دهنده بروز تنش مختصر در گیاه در روش کم‌آبیاری است. اگرچه، میزان بهره‌وری مصرف آب در روش کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری بیشتر از روش آبیاری غرقاب کامل بود اما عملکرد شلتوک در هر دو منطقه کاهش معنی‌داری داشت. از سوی دیگر، با توجه به پاسخ‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه به کاربرد کود پتاسیمی، به‌ویژه تیمار کاربرد نیمی از کود پتاسیم سولفات به‌صورت پایه و نیمی از کود پتاسیم کلرید در مرحله سرک در هر دو منطقه، به‌نظر می‌رسد پتاسیم سبب حفظ فتوسنتز در شرایط تنش کم‌آبی شده و از این طریق سبب کاهش آثار نامطلوب کم‌آبی بر عملکرد شلتوک گیاه برنج شود.

و تطابق باکتری‌های غیربومی آنها با شرایط محیطی، خاک و نوع کشت در مناطق دیگر باشد (Bakhshandeh et al., 2017b). در همین راستا، پیش‌تر نیز گزارش شده بود که ریزجانداران جداسازی‌شده از منطقه ریزوسفر گیاه میزبان ممکن است نسبت به ریزجانداران جداسازی‌شده از دیگر مناطق، سازگاری بهتری با گیاه میزبان داشته باشند (Gopalakrishnan et al., 2011).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، کاهش میزان کلروفیل، افزایش کارایی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II و کارایی کوانتومی غیر-فتوشیمیایی غیرتنظیم‌شده فتوسیستم II در هر دو ایستگاه

منابع

- آقاجانی دلور، ع. (۱۳۹۵) بررسی نقش قارچ شبه‌میکوریز *Piriformospora indica* بر خصوصیات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و عملکرد دو رقم برنج در شرایط کم‌آبیاری. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد.
- آمارنامه سازمان جهاد کشاورزی (۱۳۹۴) آمارنامه کشاورزی، محصولات زراعی، جلد اول. وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات.
- اسدی‌صنم، س.، زواره، م.، شکری واحد، ح. و شاهین رخسار، پ. (۱۳۹۳) اثر محلول‌پاشی کود نیتروژن و پتاسیم مکمل بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج دورگ دیلم. مجله به‌زرایی کشاورزی ۱۶: ۷۰۴-۶۹۳.
- دردی‌پور، ا.، فرشادی‌راد، ا. و ارزانش، م. ح. (۱۳۸۹) تأثیر *Azospirillum lipoferum* و *Azotobacter chroococum* بر آزادسازی پتاسیم خاک در کشت گلدانی سویا. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی ۲: ۵۹۹-۵۹۳.
- ریائی، ف.، حسام، م.، هزارجریبی، ا. و عبدالحسینی، م. (۱۳۹۲) بررسی میزان کارایی مصرف آب در برنج طارم. اولین همایش ملی بهینه‌سازی مصرف آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
- شمسی‌پور، م.، فتوت، ر. و جباری، ف. (۱۳۸۹) ارتباط بین شاخص محتوی کلروفیل و عملکرد دانه گندم تحت شرایط تنش خشکی. فصلنامه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی ۲: ۱۶-۸.
- صداقت، ن.، پیردشتی، ه.، اسدی، ر. و موسوی طغانی، س. ی. (۱۳۹۳) اثر روش‌های آبیاری بر بهره‌وری آب در برنج. نشریه پژوهش آب در کشاورزی ۲۸: ۱-۹.
- عباسی‌مقدم، ا. و شبان، م. (۱۳۹۳) اثر کود پتاسیم و روی بر میزان کلروفیل برگ گلرنگ در شرایط تنش خشکی. اولین طرح تعاملی صنعت با دانشگاه. همایش سالانه پژوهش‌های کاربردی در علوم مهندسی و پایه، تهران، مرکز تحقیق و توسعه آلویام، تهران، ایران.
- عرب‌زاده، ب. و آقاجانی، س. (۱۳۸۱) برنج (رشد و نمو گیاهی، نیاز آبی، آفات و بیماری‌ها و مدیریت علف‌های هرز). معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور، آمل.
- عرفانی، ع. (۱۳۹۵) دستورالعمل تولید برنج سالم در شرایط کشاورزی پایدار. انتشارات معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور-

معاونت مازندران.

علوی‌متین، س. م.، راهنما، ا. و مسکرباشی، م. (۱۳۹۴) اثر نوع و مقادیر مختلف کود پتاسیم بر صفات زراعی و فیزیولوژیک دو رقم گندم دوروم تحت شرایط تنش شوری. تحقیقات غلات ۵: ۱۷۷-۱۸۷.

فرخی‌نیا، م.، رشدی، م.، پاسبان اسلام، ب. و ساسان دوست، ر. (۱۳۹۰) بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد گلرنگ بهاره تحت تنش کمبود آب. مجله علوم گیاهان زراعی ایران ۴: ۵۵۳-۵۴۵.

قدمی فیروزآبادی، ع.، شاه‌نظری، ع.، رائینی سرجاز، م. و زارع ایبانه، ح. (۱۳۹۴) اثر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و کم‌آبیاری ناقص ریشه بر عملکرد، فلورسانس کلروفیل و پارامترهای رشد آفتابگردان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی ۲۹: ۱۶۹-۱۵۸.

کاظمی، ش. (۱۳۹۵) ارزیابی کارایی قارچ‌های *Glomus mosseae* و *Piriformospora indica* در بهبود عملکرد دانه و خصوصیات فیزیولوژیک ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) در سطوح متفاوت فسفر و آبیاری. پایان‌نامه دکتری زراعت. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

کریمی مریدانی، م. (۱۳۹۳) اهمیت پتاسیم در حاصلخیزی خاک شالیزار. فصلنامه نظام مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲: ۳۹-۳۳. کریمی، ا.، همایی، م.، معز اردلان، م.، لیاقت، ع. م. و ریسی، ف. (۱۳۸۵) اثر کود آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب در ذرت به روش آبیاری قطره‌ای-خطی. مجله علمی پژوهشی علوم کشاورزی ۱۲: ۵۷۵-۵۶۱.

محمدیان، م. (۱۳۹۵) مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه برنج در شرایط تولید پایدار. دستورالعمل تولید برنج سالم در شرایط کشاورزی پایدار. انتشارات معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور- معاونت مازندران ۴۲-۲۴.

ملکوتی، م. ج. و افخمی، م. (۱۳۷۸) ضرورت جلوگیری از تخلیه پتاسیم خاک‌های اراضی شالیزاری شمال کشور. نشر آموزش کشاورزی. معاونت تات وزارت جهاد کشاورزی. کرج. ایران. نشریه فنی شماره ۶۲.

ملکوتی، م. ج. و کاووسی، م. (۱۳۸۳) تغذیه متعادل برنج. وزارت جهاد کشاورزی- معاونت زراعت.

ملکوتی، م. ج. و همایی، م. (۱۳۸۳) حاصلخیزی مناطق خشک (مشکلات و راه‌حل‌ها). چاپ دوم. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. مؤمنی، ف.، قبادی، م.، جلالی هنرمند، س. و شکاری، پ. (۱۳۹۳) واکنش خصوصیات فیزیولوژیک نخود به کودهای روی و پتاسیم در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی. فرآیند و کارکرد گیاهی ۳: ۸۳-۷۱.

میرنیا، س.، محمدیان، م. (۱۳۸۴) برنج، اختلالات عناصر غذایی، مدیریت عناصر غذایی (ترجمه). انتشارات دانشگاه مازندران.

نعمت‌اللهی، ا.، جعفری، ع. و باقری، ع. (۱۳۹۲) اثر تنش خشکی و سالیسیلیک اسید روی رنگدانه‌های فتوسنتزی و جذب عناصر غذایی ارقام زراعی آفتابگردان. مجله اکوفیزیولوژی گیاهی ۵: ۵۱-۳۷.

نیک‌نژاد، و. و امام، ی. (۱۳۹۰) مقدمه‌ای بر فیزیولوژی عملکرد گیاهان زراعی (ترجمه). انتشارات دانشگاه شیراز، شیراز.

یوسفیان، م. (۱۳۸۹) مطالعه بهره‌وری مصرف آب در کشت نشایی برنج (ارقام طارم و شیرودی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.

Abbasi, M. R. and Sepaskhah, A. R. (2011) Response of different rice cultivars (*oryza sativa* L.) to watersaving irrigation in greenhouse conditions. International Journal of Plant Production 5: 37-47.

Abdeshahian, M., Nabipour, M. and Meskarbasheh, M. (2010) Chlorophyll fluorescence as criterion for the diagnosis salt stress in wheat (*Triticum aestivum*) plants. International Journal of Biomedical Engineering and Technology 3: 184-186.

Andrews, J. R., Fryer, M. J. and Baker, N. R. (1995) Characterization of chilling effects on photosynthetic performance of maize crops during early season growth using chlorophyll fluorescence. Journal of Experimental Botany 46: 1195-1203.

Baker, N. R. and Roosenqvist, E. (2004) Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. Journal of Experimental Botany 55: 1607-1621.

- Bakhshandeh, E., Pirdashti, H. and Shahsavarpour Lendeh, K. (2017a) Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. *Ecological Engineering* 103: 164-169.
- Bakhshandeh, E., Pirdashti, H. and Gilani, Z. (2017b) Application of mathematical models to describe rice growth and nutrients uptake in the presence of plant growth promoting microorganisms. *Applied Soil Ecology* 124: 171-184.
- Bhiah, K. M., Guppy, P., Lockwood, P. and Jessop, R. (2010) Effect of potassium on rice lodging under high nitrogen nutrition. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions and Changing World, Brisbane, Australia.
- Cakmak, I. (1997) Role of potassium in protecting higher plants against photo-oxidative damage. In: *Food Security in the WANA Region, the Essential Need for Balanced Fertilization* (ed. Johnston, A. E.) Pp. 345-352. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P. and Pereira, J. S. (2003) Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology* 30: 239-264.
- Dobermann, A., Cassman, K. G., StaCruz, P. C., Adviento, M. A. A. and Pampolino, M. F. (1996) Fertilizer inputs, nutrient balance and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. *Effective soil K-supplying capacity. Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46: 11-21.
- FAO. (2015) Rice Production, available online from <http://www.faostat.org>.
- Gale, A., Csiszar, J., Tari, I. and Erdei, L. (2002) Changes in water and chlorophyll fluorescence parameters under osmotic stress in wheat cultivars. In: *Proceedings of the 7th Hungarian Congress on Plant Physiology*, Szeged, Hungar.
- Genty, B., Briantais, J. M. and Baker, N. R. (1989) The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta* 990: 87-92.
- Gopalakrishnan, S., Humayun, P., Kiran, B. K., Kannan, I. G. K., Vidya, M. S., Deepthi, K. and Rupela, O. (2011) Evaluation of bacteria isolated from rice rhizosphere for biological control of charcoal rot of sorghum caused by *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 27: 1313-1321.
- IRRI, PhilRice. (2005) Aerobic rice: A water-saving technology in development. Available online at: <http://www.irri.com>.
- Johnson, R., Frey, N. M. and Dale, N. (2002) Effect of water stress on photosynthesis and transpiration of flag leaves and spikes of barley and wheat. *Crop Science* 5: 728-731.
- Kalaji, H. M. and Guo, P. (2008) Chlorophyll fluorescence: a useful tool in barley plant breeding programs. *Photochemistry Research Progress* 24: 439-463.
- Kong, L., Sun, M., Wang, F., Liu, J., Feng, B., Si, J., Zhang, B., Li, S. and Li, H. (2014) Effects of high NH₄⁺ on K⁺ uptake, culm mechanical strength and grain filling in wheat. *Frontiers in Plant Science* 5: 1-10.
- Lawlor, D. W. and Cornic, G. (2002) Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants affected by N fertilization. *Agronomy Journal* 73: 583-587.
- Li, G. M., Liu, B. B., Wu, Y. and Zou, Z. R. (2008) Interactive effects of drought stresses and elevated CO₂ concentration on photochemistry efficiency of cucumber seedlings. *Journal of Integrative Plant Biology* 50: 1307-1317.
- Liu, C. H., Chao, Y. Y. and Kao, C. H. (2013) Effect of potassium deficiency on antioxidant status and cadmium toxicity in rice seedlings. *Botanical Studies* 54: 1-10.
- Mahajan, G. (2008) Yield and water productivity of rice as affected by time of transplanting in Punjab, india. *Agricultural water management* 96: 525-532.
- Marchiol, L., Letia, L., Marti, M., Pperssotti, A. and Zerbi, G. (1996) Physiological responses of two soybean cultivarsto cadmium. *Journal of Environmental Quality* 25: 562-566.
- Marschner, H. (1995) *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd Ed. Academic Press, California,.
- Mohd Zain, N. A and Ismail, M. R. (2016) Effects of potassium rates and types on growth, leaf gas exchange and biochemical changes in rice (*Oryza sativa*) planted under cyclic waterstress. *Agricultural Water Management* 164: 83-90.
- Motamed, M., Asadi, R., Rezaei, M. and Amiri, E. (2008) Response of high yielding rice varieties to NaCl salinity in greenhouse circumstances. *African Joirnal of Biotechnology* 7: 3866-3873.
- Park, J., Bolan, N., Megharaj, M. and Naidu, R. (2010) Isolation of phosphate-solubilizing bacteria and characterization of their effects on lead immobilization. *Pedologist* 53: 67-75.
- Parmar, P. and Sindhu, S. S. (2013) Potassium solubilizing by rhizosphere bacteria: influence of nutritional and environment conditions. *Journal of Microbiology Research* 3: 25-31.
- Pervez, H., Ashraf, M. and Makhdum, M. I. (2004) Influence of potassium nutrition on gas exchange characteristics and water relations in cotton (*Gossypiumhirsutum* L.). *Photosynthetica* 42: 251-255.
- Pirdashti, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Nematzadeh, G. and Ismail, A. (2004) Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. In: *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, Brisbane, Australia.

- Porra, R J. (2002) The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. *Photosynthesis Research* 73: 149-156.
- Qi-chun, Z., Guang-huo, W., Yu-ke, F., Peiyuan, Q. and Schoenau, J. J. (2011) Effect of potassium fertilization on soil potassium pools and rice response in an intensive cropping system in China. *Journal of Plant Nutrition* 174: 73-80.
- Rad, H. E., Aref, F. and Rezaei, M. (2012) Rice growth and yield components respond to changes in water salinity stress. *World Applied Sciences Journal* 20: 997-1007.
- Reddy, A., Chaitanya, K. and Vivekanandanb, M. (2004) Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology* 161: 1189-1202.
- Rehm, G. and Schmitt, M. (2002) Potassium for crop production. University of Minnesota.
- Shangguan, F. J., Shao, M. and Dyckmans, J. (2000) Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat. *Journal of Plant Physiology* 156: 45-51.
- Umar, S. (2006) Alleviating adverse effects of water stress on yield of sorghum, mustard and groundnut by potassium application. *Pakistan Journal of Botany* 38: 1373-1380.
- Vessy, K. (2003) Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil* 255: 571-586.
- Yaghoubian, Y., Siadat, S. A., Moradi Telavat, M. R. and Pirdashti, H. (2016) Quantify the response of purslane plant growth, photosynthesis pigments and photosystem II photochemistry to cadmium concentration gradients in the soil. *Russian Journal of Plant Physiology* 63: 77-84.
- Yaghoubi Khangahi, M., Pirdashti, H., Rahimian, H., Nematzadeh, Gh. and Ghajar Sepanlou, M. (2017) Potassium solubilising bacteria (KSB) isolated from rice paddy soil: from isolation, identification to K use efficiency. *Symbiosis* 77:1-11.
- Zaman, U., Ahmad, Z., Farooq, M., Saeed, S., Ahmad, M. and Wakeel, A. (2015) Potassium fertilization may improve stem strength and yield of Basmati rice grown on nitrogen fertilized soils. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 52: 1-7.
- Zlatev, Z. (2009) Drought-induced changes in chlorophyll fluorescence of young wheat plants. *Biotechnology and Biotechnological Equipment* 23: 438-441.
- Zlatev, Z. and Yordanov, I. T. (2004) Effect of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 30: 3-18.

Effect of foliar application of iron nanoparticles on improvement of some physiological and morphological traits of purslane (*Portulaca oleracea*) under cadmium stress

Seyed Hossein Mohseni¹, Mohammad Ali Esmaeli¹, Hemmatollah Pirdashti*², Rahmat Abasi¹ and Morteza Nasiri³

¹ Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

² Department of Agronomy, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

³ Of the Rice Research Institute of Iran, Mazandaran branch, Agricultural research, Extension Organization (AREEO), Amol, Iran

(Received: 08/01/2018, Accepted: 21/08/2018)

Abstract

In order to investigate the effects of foliar spraying of iron nanoparticles on improvement of some physiological and morphological traits of purslane (*Portulaca oleracea*) under cadmium stress, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. The experiment was conducted under greenhouse conditions at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University during 2017. The experimental factors included cadmium chloride in six levels (0, 25, 50, 75, 100 and 125 mg/kg soil) and foliar spray of iron nanoparticles in five levels (0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 g/l). The results showed that the interaction effects of iron nanoparticles and cadmium were significant on leaf area, root dry weight and proline content at 5% as well as leaf dry weight and chlorophyll contents at 1% probability level. The leaf area responded a linear decrease trend with increasing cadmium levels at levels of 0, 0.5, 0.75 and 1 g/l of foliar spraying of iron nanoparticles. By contrast, as a segmented model at concentration of 0.25 g/l. Foliar spraying of iron nanoparticles at all four levels increased root dry weight to 25 mg/kg of cadmium, but at levels above 25, the root dry weight decreased at higher level of Cd. Meanwhile, the concentration of 0.5 g/l of foliar spraying of iron nanoparticles had the most effect on root dry weight by 34.80% increase as compared to the control. SPAD value increased in both levels of 0.5 and 0.75 to 25 mg/kg of soil cadmium, 11.19 and 28.99% respectively, as compared to the control. In general, our results, indicated that foliar application of iron nanoparticles was effective to improve cadmium tolerance in purslane plant in low cadmium concentrations. However, more research is needed to investigate the mechanism of iron nanoparticles.

Keywords: Stress, Phytoremediation, Heavy metals, Nanoparticles.