

## پاسخ چهار دورگه ذرت به کمبود آهن و روی در محلول غذایی در شرایط کشت بدون خاک، I: رشد گیاه و ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل برگ

حمید رضا عشقی زاده<sup>۱\*</sup>، امیرحسین خوشگفتارمنش<sup>۲</sup>، پرویز احسان‌زاده<sup>۳</sup> و محمد کافی<sup>۴</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۱/۱۶)

### چکیده

ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل برگ و رشد چهار دورگه ذرت شامل دو دورگه ذرت شیرین (*Zea mays* L. cv. *Saccharata*) سینگل کراس کرج ۴۰۳ و ۴۰۴ و دو دورگه ذرت دانه‌ای (*Zea mays* L.) سینگل کراس ۵۰۰ و ۷۰۰ در دو سطح آهن شامل ۵ و ۵۰ میکرومولار از منبع FeEDTA و دو سطح روی شامل صفر و ۲ میکرومولار از منبع سولفات روی در محلول غذایی بررسی شد. این مطالعه به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در پاییز سال ۱۳۸۵ در گلخانه تحقیقاتی مرکز پژوهشی کشت بدون خاک دانشگاه صنعتی اصفهان در محیط هیدروپونیک انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت آهن محلول غذایی از ۵ به ۵۰ میکرومولار، مقادیر فلورسانس کمینه ( $F_0$ )، فلورسانس بیشینه ( $F_m$ ) و کارایی کوانتومی فتوسنتز II ( $F_v/F_m$ ) را به ترتیب حدود ۴۸٪، ۹۶٪ و ۱۲۳٪ افزایش داد. این مقادیر هم‌چنین تحت تأثیر نوع نژادگان مورد مطالعه بود به گونه‌ای که بین آنها از نظر  $F_v/F_m$  و  $F_0$  در سطح احتمال ۱٪ و از نظر  $F_m$  در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌دار دیده شد. کمبود آهن به شکل معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) وزن خشک ریشه دورگه‌های مورد مطالعه را کاهش داد. هم‌چنین کمبود روی منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه دورگه‌های ۵۰۰ و ۴۰۳ شد در حالی که تفاوت معنی‌داری در مورد دورگه‌های ۷۰۰ و ۴۰۴ مشاهده نگردید. نتایج این مطالعه نشان داد که تحمل به کمبود آهن و روی در دورگه‌های مورد مطالعه تفاوت چشمگیری داشت. بر اساس نتایج به دست آمده از ویژگی‌های رشد و فلورسانس کلروفیل برگ دورگه‌های مورد مطالعه، دو دورگه ذرت دانه‌ای به کمبود آهن و روی در محلول غذایی متحمل‌تر از دو دورگه ذرت شیرین بودند. به نظر می‌رسد که ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل بتواند به عنوان یک شاخص مناسب در غربال دورگه‌های متحمل به کمبود روی و به ویژه کمبود آهن مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فلورسانس کلروفیل، دورگه ذرت، روی، آهن، محلول غذایی

۱. عضو هیئت علمی مرکز پژوهشی کشت بدون خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان
  ۲. دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
  ۳. دانشیار زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
  ۴. استاد زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
- \*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hamid.eshghizadeh@gmail.com

## مقدمه

کمبود عناصر کم نیاز آهن و روی در بسیاری از محصولات زراعی در سطح جهان، به ویژه در خاک‌های آهنی ایران به علت پ- هاش قلیایی و درصد بالای آهن رایج است (۲، ۱۴ و ۱۹). نتایج بسیاری از مطالعات نشان داده است که کارایی روش‌های مختلف کوددهی در برطرف کردن کمبود آهن و روی در گیاهان زراعی پایین است (۱۲، ۱۳ و ۱۶). از این رو، یافتن راه‌کارهای اثربخش، دارای توجیه اقتصادی و سازگار با محیط زیست در مبارزه با کمبود عناصر غذایی مورد توجه می‌باشد. کاشت گیاهان مقاوم به کمبود آهن و روی یکی از روش‌های مناسب و کارآمد برای پیشگیری از کمبود این عناصر است (۱۶).

بسیاری از تفاوت‌های عمده بین نژادگان گیاهان در ارتباط با مصرف عناصر معدنی ضروری تحت کنترل ژنتیک هستند ولی بیان این ژن‌ها در شرایط مختلف محیط رشد تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند (۱، ۲ و ۱۶). این تفاوت‌های نژادی می‌تواند به توضیح یا تفسیر سازگاری گیاهان با شرایط کمبود عناصر معدنی کمک کرده (۲۱) و هم‌چنین اساس سازگاری بهتر و بقای گیاهان را در شرایط کمبود شدید عناصر معدنی فراهم سازد. از جمله بارزترین پاسخ‌های گیاهان به تنش‌های محیطی، کم شدن فتوسنتز ناشی از اختلال در فعالیت فتوسیستم II می‌باشد (۳ و ۱۵). تحت چنین شرایطی به دنبال کاهش فتوسنتز و ذخیره فرآورده‌های انتقال الکترون یعنی ATP و NADPH در واکنش‌های وابسته به نور در فتوسنتز، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) کاهش پیدا می‌کند. در واقع مقدار فرود (Quenching) انرژی الکترون برانگیخته شده از مسیر غیر فتوشیمیایی (Nonphotochemical quenching, qNP) افزایش یافته و از این طریق فتوسیستم II به طور منفی تنظیم می‌شود. هنگامی که نور در سطح معمول بوده و مراکز واکنش کلروفیل کاملاً باز باشند، بخش غالب آن در فعالیت‌های فتوشیمیایی به مصرف می‌رسد و در نهایت تنها بخش کمی از انرژی نورانی به صورت فلورسانس بازتاب می‌شود که به آن

فلورسانس کمینه یا پایه (Initial fluorescence,  $F_0$ ) می‌گویند. در این صورت فرونشاندن انرژی الکترون برانگیخته شده از طریق فتوشیمیایی (ΦP) (Photochemical quenching, qn) نزدیک به ۱ است. در مقابل هنگامی که برگ در معرض پالسی از نور اشباع قرار می‌گیرد تمامی مولکول‌های موسوم به کوئینون آ (Quinone A) دست کم به صورت موقت به صورت احیا در آمده و به دلیل تداوم واکنش‌های فتوشیمیایی فتوسیستم II، مراکز واکنش اشباع و بسته می‌شوند، فلورسانس به میزان بالایی افزایش می‌یابد که به آن فلورسانس بیشینه (Maximum fluorescence,  $F_m$ ) اطلاق می‌شود.

در چنین حالتی، فرونشاندن انرژی الکترون برانگیخته شده از طریق فتوشیمیایی (ΦP) نزدیک به صفر است (۱۸). تجزیه فلورسانس کلروفیل، روشی سریع و غیر تخریبی برای ارزیابی نحوه عملکرد سیستم فتوسنتزی در طول و بعد از تنش محیطی فراهم می‌کند و اطلاعات حاصل از آن برای مشخص کردن سرعت انتقال الکترون و چگونگی فرود انرژی الکترون برانگیخته به کار می‌رود (۱۵). حتی امروزه در گونه‌های  $C_4$  مثل ذرت که میزان تنفس نوری در آنها پایین است، اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل جانشین اندازه‌گیری تبادل گازی برای سنجش کارایی انرژی تابش فعال فتوسنتزی (Photosynthetically Active Radiation) جاری شده است (۱۵). تنش‌های محیطی از جمله تنش کمبود آهن باعث کاهش عملکرد کوانتومی فتوسیستم II ( $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ ) در شرایط سازگار شده با تاریکی در گیاهان مختلف از جمله چغندر قند می‌شوند (۵). از این رو در نژادگان مختلف مقدار کاهش عملکرد کوانتومی ( $F_v/F_m$ ) به عنوان معیاری از درجه تحمل به تنش مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱، ۱۷ و ۲۴).

آزمایش حاضر با هدف ارزیابی ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل برگ و پاسخ رشدی دوره‌های مختلف ذرت به کمبود آهن و روی در محلول غذایی انجام شد که با تکمیل و توسعه نتایج آن در آزمایش‌های مزرعه‌ای و در محیط خاک می‌تواند از طریق انتخاب دوره مناسب‌تر در کاهش مشکلات

فلورسانس بیشینه:  $F_m$

کارایی کوانتومی فتوسیستم II:  $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$  سپس گیاهان مورد نظر از هر محلول غذایی خارج شده و بخش هوایی و ریشه آنها از یکدیگر جدا شد. تعداد برگ ظهور یافته و تعداد برگ کامل شمارش شد. هم‌چنین سطح برگ به وسیله دستگاه سطح برگ سنج الکترونیکی (Model GA-5, Japan)، طول ریشه بر حسب سانتی‌متر و حجم ریشه بر اساس سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد (۸). ریشه و بخش هوایی هر گیاه به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار داده شده و وزن خشک آنها با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت. نمودارها با نرم‌افزار اکسل رسم و میانگین صفات اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ مقایسه شدند.

## نتایج

### ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل ( $F_v/F_m$ و $F_m$ , $F_0$ )

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل ( $F_v/F_m$  و  $F_m$ ,  $F_0$ ) نشان داد که غلظت آهن محلول غذایی تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر مقادیر آنها داشته است (جدول ۲). افزایش غلظت آهن محلول غذایی از ۵ به ۵۰ میکرومولار مقادیر  $F_m$ ,  $F_0$  و  $F_v/F_m$  را به ترتیب حدود ۴۸٪، ۹۶٪ و ۱۲۳٪ افزایش داد (جدول ۳). در مقابل، کمبود روی تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل نداشت (جدول ۲ و ۳).

ویژگی‌های فلورسانس کلروفیل در بین نژادگان‌های مورد مطالعه متفاوت بود به گونه‌ای که بین نژادگان‌ها از نظر  $F_0$  و  $F_v/F_m$  در سطح احتمال ۱٪ و از نظر  $F_m$  در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌دار مشاهده شد (جدول ۲). به طور کلی دورگه‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ ذرت دانه‌ای نسبت به دورگه‌های ۴۰۳ و ۴۰۴ ذرت شیرین مقادیر بالاتری از ویژگی‌های بازتاب فلورسانسی را به خود اختصاص دادند.

ناشی از کمبود عناصر غذایی در سطح مزارع ذرت کشور راهگشا باشد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در پاییز سال ۱۳۸۵ در گلخانه تحقیقاتی مرکز پژوهشی کشت بدون خاک دانشگاه صنعتی اصفهان با میانگین دمای روزانه و شبانه به ترتیب حدود ۲۲ و ۱۸ درجه سلسیوس و شدت نور حدود ۴۰۰۰۰ لوکس در محیط هیدروپونیک انجام شد. چهار دورگه ذرت شامل دو دورگه ذرت شیرین (*Zea mays* L. cv. *Saccharata*) سینگل کراس کرج ۴۰۳ و ۴۰۴ و دو دورگه ذرت دانه‌ای (*Zea mays* L.) سینگل کراس ۵۰۰ و ۷۰۰ در معرض دو سطح آهن شامل ۵ و ۵۰ میکرومولار از منبع FeEDTA و دو سطح روی شامل صفر و ۲ میکرومولار از منبع سولفات روی در محلول غذایی قرار گرفتند. ترکیب محلول غذایی مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. بذر دورگه‌های مورد نظر ابتدا به وسیله محلول هیپو کلریت سدیم ۲ درصد ضدعفونی شده و سپس در گلدان‌های حاوی ماسه شسته، کاشته شدند. پس از این که گیاهچه‌ها به مرحله دو برگگی رسیدند، به ظرف‌های حاوی محلول‌های تهیه شده منتقل شده و پس از استقرار آنها سامانه تهویه نیز برای ظرف‌های مورد نظر راه اندازی شد. اسیدیته محلول (pH) حدود ۵/۷ و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) حدود ۲/۵ دسی‌زیمنس در متر در طول دوره آزمایش تنظیم شد.

بعد از گذشت حدود ۳۰ روز از اعمال تیمارها، سنجش وضعیت فلورسانس کلروفیل به وسیله دستگاه فلورومتر (Chlorophyll Fluorometer, Opti-Science, OS-30p, London) و از محل میانه برگ و بین رگبرگ اصلی و لبه جوان‌ترین برگ کامل هر گیاه اندازه‌گیری شد (۲۴). ویژگی‌های اندازه‌گیری شده شامل موارد زیر بودند:

فلورسانس کمینه:  $F_0$

جدول ۱. ترکیب شیمیایی محلول غذایی مورد استفاده (۲)

غلظت (میکرو مولار)	عناصر کم نیاز	غلظت (میلی مولار)	عناصر پر نیاز
۵۰	Cl	۸/۰	N
۲/۰	Mn	۳/۰	K
۲/۰ (۰)*	Zn	۲/۰	Ca
۰/۵	Cu	۱/۰	P
۰/۵	Mo	۰/۵	S
۲۵	B	۰/۵	Mg
۵۰ (۵) <sup>x</sup>	Fe		

\*: غلظت عنصر در تیمار کمبود

جدول ۲. مقادیر درجه آزادی و سطح احتمال معنی دار بودن مربوط به آرایشی فاکتوریل با سه عامل غلظت آهن، غلظت روی و دورگه ذرت

مقدار F						درجه آزادی			منبع تغییر	
وزن خشک هوایی	وزن خشک ریشه	سطح برگ	تعداد برگ کامل	طول ریشه	حجم ریشه	Fv/Fm	Fm	F <sub>0</sub>	درجه آزادی	
**	**	**	**	**	**	**	**	** <sup>۱</sup>	۱	آهن
NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	۱	روی
*	**	**	*	**	**	**	*	**	۳	دورگه
NS	**	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	۱	آهن×روی
NS	**	NS	NS	**	**	**	**	**	۳	آهن×دورگه
NS	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	۳	روی×دورگه

\* و \*\*: اختلاف معنی دار در سطح ۰/۵٪ و ۰/۱٪ وجود دارد. NS: اختلاف معنی دار وجود ندارد

جدول ۳. میانگین مقادیر و مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نژادگان‌های مختلف ذرت تحت تأثیر کمبود و کفایت آهن و روی محلول غذایی

ویژگی‌های هر گیاه									غلظت عنصر
وزن خشک هوایی (g/plant)	وزن خشک ریشه (g/plant)	سطح برگ (cm <sup>2</sup> )	تعداد برگ کامل	طول ریشه (cm)	حجم ریشه (cm <sup>3</sup> )	Fv/Fm	Fm	F <sub>0</sub>	(μM)
۰/۲ <sup>b</sup>	۰/۱ <sup>b</sup>	۱۱۸ <sup>b</sup>	۱/۹ <sup>b</sup>	۱۵/۳ <sup>b</sup>	۱/۷ <sup>b</sup>	۰/۲ <sup>b</sup>	۱۸۱ <sup>b</sup>	۱۱۴ <sup>b*</sup>	۵
۰/۷ <sup>a</sup>	۰/۳ <sup>a</sup>	۲۶۸ <sup>a</sup>	۳/۱ <sup>a</sup>	۳۰/۴ <sup>a</sup>	۶/۰ <sup>a</sup>	۰/۵ <sup>a</sup>	۳۵۵ <sup>a</sup>	۱۶۹ <sup>a</sup>	۵۰
۰/۴ <sup>a</sup>	۰/۱ <sup>b</sup>	۱۹۸ <sup>a</sup>	۲/۱ <sup>a</sup>	۲۲/۰ <sup>a</sup>	۴/۱ <sup>a</sup>	۰/۳ <sup>a</sup>	۲۶۰ <sup>a</sup>	۱۴۰ <sup>a</sup>	۰
۰/۴ <sup>a</sup>	۰/۲ <sup>a</sup>	۱۸۸ <sup>a</sup>	۲/۹ <sup>a</sup>	۲۴/۰ <sup>a</sup>	۴/۰ <sup>a</sup>	۰/۴ <sup>a</sup>	۲۷۶ <sup>a</sup>	۱۴۳ <sup>a</sup>	۲
۰/۱	۰/۱	۶۷/۵	۰/۹	۳/۱	۰/۵	۰/۱	۴۷/۰	۲۴/۸	(/۵) LSD

\*: برای هر صفت و در هر تیمار میانگین‌های با حروف مشابه بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی دار (LSD) در سطح ۰/۵٪ اختلاف معنی داری ندارند.

هیبریدهای ذرت متفاوت بود به طوری که بیشترین طول ریشه به دورگه ۵۰۰ و کمترین آن به دورگه ۴۰۳ اختصاص داشت (جدول ۴). تأثیر کمبود آهن بر طول ریشه بسته به نوع هیبرید متفاوت بود و دورگه ۵۰۰ بیشترین و دورگه ۷۰۰ کمترین کاهش رشد ریشه را در شرایط کمبود آهن به خود اختصاص دادند (جدول ۵). تأثیر کمبود روی بر رشد طولی ریشه از نظر آماری معنی دار نشد (جدول ۲ و ۳).

#### تعداد برگ کامل (ظهور زبانه) در گیاه

به جز اثر غلظت آهن محلول غذایی ( $P < 0/01$ ) و دورگه ( $P < 0/05$ ) تأثیر سایر عوامل و برهمکنش‌ها بر تعداد برگ کامل دورگه‌ها معنی دار نشد (جدول ۲). کمبود آهن و روی به ترتیب کاهش حدود ۶۵ و ۳۷ درصدی تعداد برگ کامل را به دنبال داشت (جدول ۳). هم‌چنین دورگه ۷۰۰ و دورگه ۴۰۴ به ترتیب کمترین و بیشترین تعداد برگ را به خود اختصاص دادند (جدول ۴).

#### سطح برگ (سانتی متر مربع در گیاه)

کمبود آهن تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر سطح برگ دورگه‌ها داشت (جدول ۲) و منجر به کاهش حدود ۱/۲۷ برابری آن شد (جدول ۳). در قابل، کمبود روی تأثیر معنی‌داری بر سطح برگ نداشت (جدول ۲ و ۳). سطح برگ هم‌چنین تحت تأثیر نوع نژادگان‌های مورد مطالعه بود و دورگه‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ ذرت دانه‌ای نسبت به دورگه‌های ۴۰۳ و ۴۰۴ ذرت شیرین سطح برگ بیشتری داشتند (جدول ۴).

سطح برگ ذرت نیز تحت تأثیر برهمکنش تغذیه آهن و روی محلول غذایی ( $P < 0/01$ ) قرار گرفت (جدول ۲). در شرایط کفایت عنصر روی، کاهش غلظت آهن محلول غذایی تأثیر چشمگیرتری بر افت رشد برگ داشت (شکل ۲).

#### وزن خشک ریشه (گرم در گیاه)

کمبود آهن تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر وزن خشک ریشه دورگه‌ها داشت (جدول ۲) و منجر به کاهش حدود ۱/۸۲

مقادیر  $F_0$ ،  $F_m$  و  $F_v/F_m$  در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر برهمکنش تغذیه آهن و دورگه قرار گرفت (جدول ۲). مقدار  $F_0$  در دورگه‌های ۴۰۳ و ۴۰۴ پاسخ مثبتی به افزایش غلظت آهن محلول غذایی نشان دادند در حالی که پاسخ دورگه‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ متفاوت و منفی بود. روند مشابهی در مورد پارامتر  $F_m$  نیز دیده شد. کمبود آهن سبب کاهش  $F_v/F_m$  در نژادگان‌های ذرت شد که این کاهش به ویژه در دورگه ۴۰۴ بیشتر بود (جدول ۵).

#### حجم ریشه (سانتی متر مکعب)

کمبود آهن تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر حجم ریشه دورگه‌ها داشت (جدول ۲) و منجر به کاهش حدود ۲/۸۳ برابری آن شد (جدول ۳). در مقابل، تأثیر کمبود روی بر حجم ریشه از نظر آماری معنی دار نشد (جدول ۲ و ۳). حجم ریشه هم‌چنین تحت تأثیر نوع نژادگان‌های مورد مطالعه بود و دورگه‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ ذرت دانه‌ای نسبت به دورگه‌های ۴۰۳ و ۴۰۴ ذرت شیرین مقادیر بالاتری را به خود اختصاص دادند (جدول ۴). حجم ریشه دورگه‌ها هم‌چنین تحت تأثیر برهمکنش تغذیه آهن و دورگه ( $P < 0/01$ ) قرار گرفت (جدول ۲) و افزایش غلظت آهن محلول غذایی از ۵ به ۵۰ میکرومولار منجر به پاسخ مثبت دورگه‌های مورد مطالعه به ویژه در دورگه‌های ذرت دانه‌ای شد (جدول ۵). پاسخ دورگه‌های ذرت به کمبود روی به طور معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) متفاوت بود (جدول ۲). افزایش غلظت روی محلول غذایی از صفر به ۲ میکرومولار منجر به افزایش حجم ریشه در دورگه‌های ۴۰۳ و ۴۰۴، کاهش حجم ریشه در دورگه ۵۰۰ و تقریباً بدون تأثیر در مورد دورگه ۷۰۰ بود (شکل ۱).

#### طول ریشه اصلی (سانتی متر)

طول ریشه دورگه‌های ذرت مورد مطالعه در سطح احتمال ۱٪ تحت تأثیر تغذیه آهن، دورگه و برهمکنش بین آنها قرار گرفت (جدول ۲). کمبود آهن در محلول غذایی کاهش ۹۸ درصدی طول ریشه را به دنبال داشت (جدول ۳). طول ریشه در بین

جدول ۴. میانگین مقادیر و مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نژادگان‌های مختلف ذرت

ویژگی‌های هر گیاه										
دورگه	شماره	F <sub>0</sub>	Fm	Fv/Fm	حجم ریشه (ml)	طول ریشه (cm)	تعداد برگ کامل	سطح برگ (cm <sup>2</sup> )	وزن خشک ریشه (g)	وزن خشک هوایی (g)
ذرت شیرین	۴۰۳	۱۳۰ <sup>bc*</sup>	۲۶۰ <sup>ab</sup>	۰/۳ <sup>bc</sup>	۲/۰ <sup>d</sup>	۱۶/۲ <sup>c</sup>	۲/۱ <sup>ab</sup>	۱۲۰ <sup>b</sup>	۰/۱ <sup>b</sup>	۰/۴ <sup>b</sup>
	۴۰۴	۹۵/۷ <sup>c</sup>	۱۹۷ <sup>b</sup>	۰/۲ <sup>c</sup>	۳/۰ <sup>c</sup>	۱۸/۱ <sup>bc</sup>	۱/۵ <sup>b</sup>	۱۵۶ <sup>b</sup>	۰/۱ <sup>b</sup>	۰/۳ <sup>b</sup>
ذرت دانه‌ای	۵۰۰	۱۴۶ <sup>b</sup>	۲۹۴ <sup>a</sup>	۰/۵ <sup>a</sup>	۷/۳ <sup>a</sup>	۳۵/۹ <sup>b</sup>	۳/۰ <sup>a</sup>	۲۹۶ <sup>a</sup>	۰/۳ <sup>a</sup>	۰/۶ <sup>a</sup>
	۷۰۰	۱۹۳ <sup>a</sup>	۳۲۰ <sup>a</sup>	۰/۴ <sup>ab</sup>	۴/۰ <sup>b</sup>	۲۹/۱ <sup>b</sup>	۳/۳ <sup>a</sup>	۲۰۰ <sup>a</sup>	۰/۲ <sup>b</sup>	۰/۴ <sup>b</sup>
(٪) LSD										
		۳۵/۱	۶۶/۵	۰/۱	۰/۸	۴/۴۰	۱/۳	۹۵/۵	۰/۱	۰/۲

\*: برای هر صفت و در هر تیمار میانگین‌های با حروف مشابه بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح ٪۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۵. میانگین مقادیر و مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نژادگان‌های مختلف ذرت

غلظت آهن (میکرومولار)	دورگه	F <sub>0</sub>	Fm	Fv/Fm	حجم ریشه (ml)	طول ریشه (cm)	وزن خشک ریشه (g)
۵	۴۰۳	۷۱/۰ <sup>d</sup>	۱۱۵ <sup>c</sup>	۰/۲ <sup>d</sup>	۰/۸ <sup>e</sup>	۱۱/۲ <sup>e</sup>	۰/۰۵ <sup>d</sup>
	۴۰۴	۰/۰ <sup>e</sup>	۰/۰ <sup>d</sup>	۰/۰ <sup>e</sup>	۱/۴ <sup>e</sup>	۱۴/۴ <sup>de</sup>	۰/۰۷ <sup>d</sup>
۵۰	۵۰۰	۱۵۴ <sup>bc</sup>	۲۶۵ <sup>b</sup>	۰/۴ <sup>bc</sup>	۲/۹ <sup>d</sup>	۱۹/۳ <sup>cd</sup>	۰/۱۴ <sup>cd</sup>
	۷۰۰	۲۳۰ <sup>a</sup>	۳۴۶ <sup>b</sup>	۰/۳ <sup>c</sup>	۱/۷ <sup>e</sup>	۱۶/۵ <sup>ode</sup>	۰/۱۲ <sup>cd</sup>
۵۰	۴۰۳	۱۹۰ <sup>ab</sup>	۴۰۵ <sup>a</sup>	۰/۵ <sup>ab</sup>	۳/۳ <sup>d</sup>	۲۱/۳ <sup>bc</sup>	۰/۱۹ <sup>bc</sup>
	۴۰۴	۱۹۱ <sup>ab</sup>	۳۹۵ <sup>a</sup>	۰/۵ <sup>ab</sup>	۴/۵ <sup>c</sup>	۲۱/۸ <sup>bc</sup>	۰/۱۸ <sup>bc</sup>
۵۰	۵۰۰	۱۳۹ <sup>c</sup>	۳۲۴ <sup>ab</sup>	۰/۶ <sup>a</sup>	۱۱/۷ <sup>a</sup>	۵۲/۵ <sup>a</sup>	۰/۴۷ <sup>a</sup>
	۷۰۰	۱۵۷ <sup>bc</sup>	۲۹۵ <sup>b</sup>	۰/۴ <sup>abc</sup>	۶/۱ <sup>b</sup>	۲۶/۱ <sup>b</sup>	۰/۲۴ <sup>b</sup>
(٪) LSD							
		۴۹/۶	۹۴/۱	۰/۱	۱/۱	۶/۲	۰/۰۶

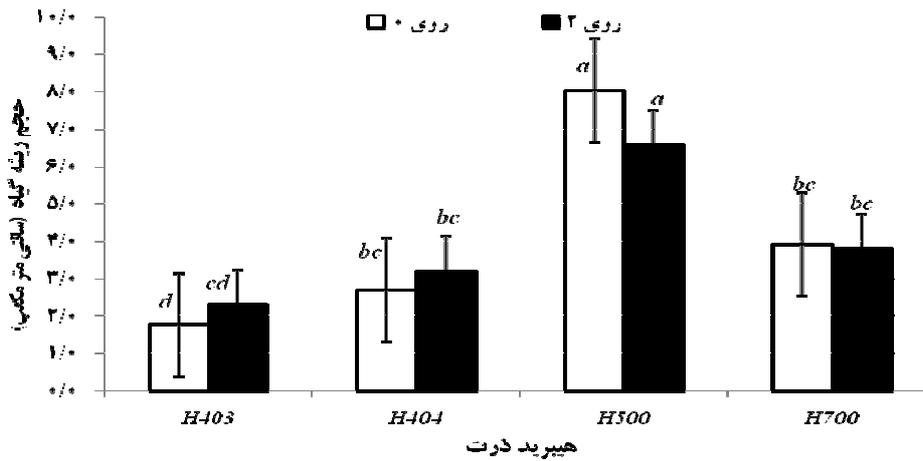
برای هر صفت و در هر تیمار میانگین‌های با حروف مشابه بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح ٪۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

وزن خشک ریشه دورگه‌ها تحت تأثیر برهمکنش آهن و دورگه (P<۰/۰۱) قرار گرفت (جدول ۲) و افزایش غلظت آهن محلول غذایی از ۵ به ۵۰ میکرومولار منجر به پاسخ مثبت دورگه‌های مورد مطالعه به ویژه در دورگه‌های ذرت دانه‌ای شد (جدول ۵). پاسخ دورگه‌های ذرت به کمبود روی به طور معنی‌داری (P<۰/۰۵) متفاوت بود (جدول ۲). دورگه‌های ۴۰۳ و ۵۰۰ به کمبود حساس تر بودند (شکل ۴).

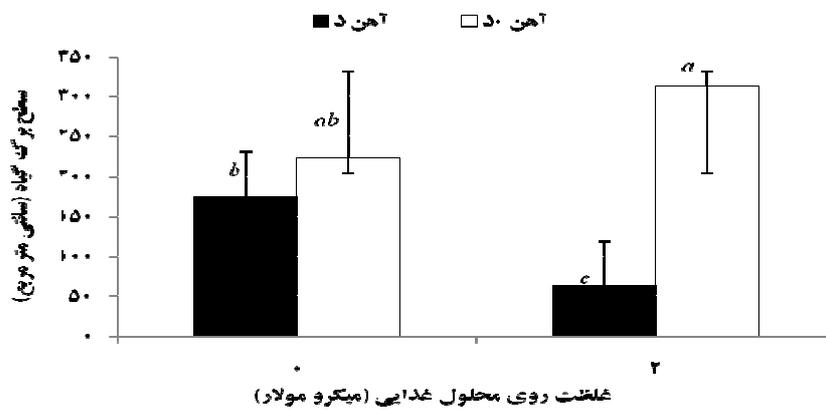
#### وزن خشک بخش هوایی (گرم در گیاه)

به جز اثر آهن (P<۰/۰۱) و دورگه (P<۰/۰۵) تأثیر سایر

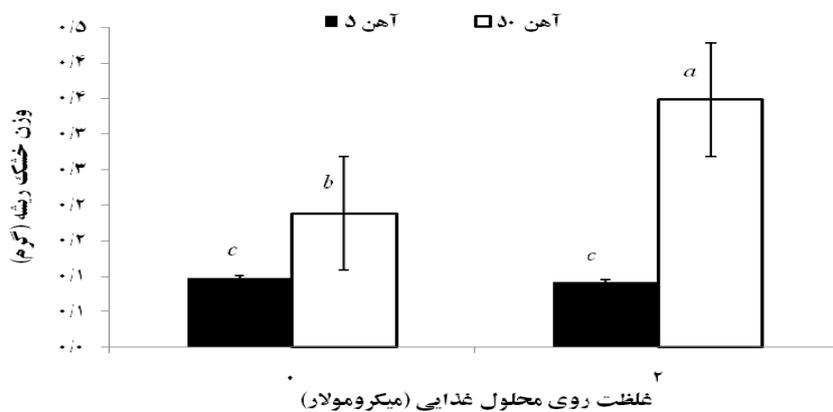
برابری آن شد (جدول ۳). کاهش حدود ۵۳ درصدی وزن خشک ریشه در شرایط کمبود روی از نظر آماری در سطح احتمال ٪۱ معنی‌دار شد (جدول ۲ و ۳). وزن خشک ریشه هم‌چنین تحت تأثیر (P<۰/۰۱) نوع نژادگان‌های مورد مطالعه بود (جدول ۲) و دورگه‌های ۵۰۰ و ۷۰۰ ذرت دانه‌ای نسبت به دورگه‌های ۴۰۳ و ۴۰۴ ذرت شیرین وزن خشک ریشه بالاتری را به خود اختصاص دادند (جدول ۴). وزن خشک ریشه دورگه‌ها هم‌چنین تحت تأثیر برهمکنش اثرات غلظت آهن و روی محلول غذایی (P<۰/۰۱) قرار گرفت (جدول ۲). در شرایط کفایت عنصر روی، تأثیر افزایش غلظت آهن محلول غذایی چشمگیرتر بود (شکل ۳).



شکل ۱. برهمکنش آثار غلظت عنصر روی محلول غذایی (صفر و ۲ میکرومولار از منبع سولفات روی) و دورگه ذرت بر حجم ریشه هر گیاه



شکل ۲. برهمکنش اثرات غلظت عنصر آهن (۵ و ۵۰ میکرومولار از منبع FeEDTA) و روی (صفر و ۲ میکرومولار از منبع سولفات روی) محلول غذایی بر سطح برگ هر گیاه



شکل ۳. برهمکنش اثرات غلظت عنصر آهن (۵ و ۵۰ میکرومولار از منبع FeEDTA) و روی (صفر و ۲ میکرومولار از منبع سولفات روی) محلول غذایی بر وزن خشک ریشه هر گیاه

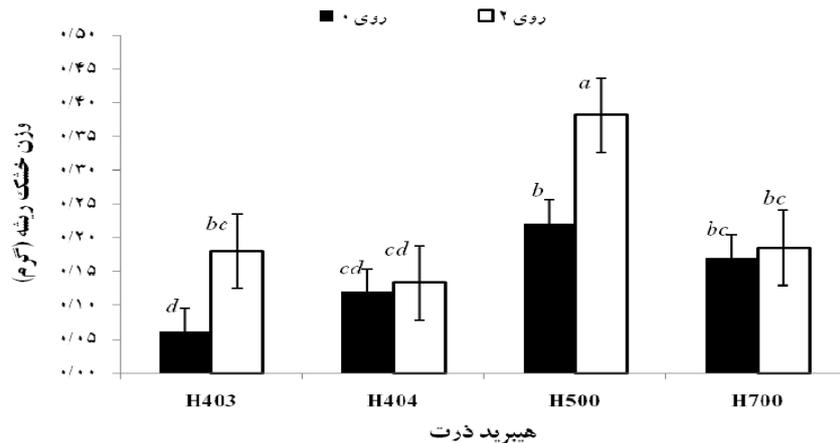
عوامل و برهمکنش‌ها بر وزن خشک بخش هوایی دورگه‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۲). کمبود آهن و روی محلول غذایی به ترتیب کاهش حدود ۲/۸ و ۱/۱ برابری وزن خشک بخش هوایی را به دنبال داشت (جدول ۳). هم‌چنین دورگه ۵۰۰ و دورگه ۴۰۴ به ترتیب کمترین و بیشترین وزن خشک بخش هوایی را به خود اختصاص دادند (جدول ۴).

## بحث

در مطالعات متعدد ثابت شده است که اندازه‌گیری فلورسانس تابشی از کلروفیل برگ‌های سالم در روی گیاه، روش معتبر و قابل اطمینانی در مطالعه و بررسی فرآیند فتوسنتز و ارزیابی وضعیت فیزیولوژیکی گیاه است (۱۸ و ۲۰) و بنابراین فیزیولوژیست‌ها و اکوفیزیولوژیست‌ها در سطح گسترده‌ای از این روش استفاده می‌کنند (۴). با توجه به این‌که PSII به تعدادی از عوامل تنش‌زا حساسیت نشان می‌دهد، اندازه‌گیری تابش فلورسانسی کلروفیل شاخصی کمی از شدت تنش و سازوکارهای واکنش به آن را ارائه می‌دهد. افزایش تابش فلورسانسی و به دنبال آن کاهش عملکرد موثر کواتوم، نشان دهنده کم شدن توان فتوسنتزی کل گیاه است. اصلاح کنندگان گیاهی از تابش فلورسانسی کلروفیل در تشخیص سریع پاسخ ارقام یا لاین‌های مختلف نسبت به تنش‌های محیطی استفاده می‌کنند (۴). در این مطالعه نیز نشان داده شد که در شرایط تنش کمبود آهن مقدار فلورسانس پایه ( $F_0$ ) که بیانگر سطحی از فلورسانس در زمانی که پذیرنده کوئینون A (QA) PSII در بالاترین مقدار شرایط اکسیداسیونی قرار دارد (مراکز PSII باز هستند)، کمتر از غلظت ۵۰ میکرومولار آهن در محلول غذایی بود (جدول ۳). هم‌چنین مقدار  $F_m$  که بیانگر سطحی از فلورسانس در زمانی که کوئینون A (QA) PSII در بالاترین مقدار شرایط احیایی قرار دارد (مراکز PSII بسته هستند) و  $F_v/F_m$  که بیانگر بیشینه کارایی در هنگامی که نور به وسیله آنتن‌های جمع‌آوری کننده PSII جذب شده و به انرژی شیمیایی تبدیل شده است (احیا QA) است، با افزایش غلظت آهن محلول غذایی افزایش یافت (جدول ۳). این در حالی است که

کمبود روی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر این پارامترها نداشت. هنگام وقوع تنش، تسهیم انرژی بین بخش‌های فلورسانس، فرود فتوشیمیایی و فرود غیر فتوشیمیایی یا اتلاف گرما تغییر می‌کند. در حقیقت هر عاملی که باعث کاهش فتوسنتز شود و یا برای سیستم تنش‌زا باشد، فلورسانس کلروفیل را افزایش می‌دهد (۲۳). در این مطالعه نیز کاهش مقدار آهن و به دنبال آن کاهش احتمالی تعداد کلروپلاست‌ها و سایر رنگدانه‌های دخیل در فرآیند فتوسنتز (۹) باعث کاهش کارایی دستگاه فتوسنتزی گیاهان شده است. هم‌چنین نتایج به دست آمده از این مطالعه بیانگر تأثیر قابل توجه کمبود آهن بر رشد و صفات ریختی دورگه‌های ذرت بوده است (جدول ۳).

کمبود آهن افزون بر کاهش کارایی فتوسنتز، کاهش تعداد برگ و به دنبال آن کاهش سطح فتوسنتز کننده دورگه‌های ذرت را نیز به دنبال داشت (جدول ۳). برآیند این روند تأثیر خود را بر رشد ریشه و ویژگی‌های آن نظیر حجم و طول نشان داد (جدول ۳) و کاهش هم‌زمان سطح فتوسنتز کننده و کارایی فتوسنتزی باعث کاهش تولید ماده خشک دورگه‌ها شد. این مشاهدات با توجه به نقش آهن به عنوان «عامل همراه» (Co-Factor) در تعدادی از آنزیم‌ها و عوامل کاهش دهنده در فرآیندهای اصلی مربوط به سوخت و ساز گیاه شامل فتوسنتز، تنفس، حفاظت سلولی، تثبیت نیتروژن و بسیاری از روابط قابل توجه است (۷). از سوی دیگر بین دورگه‌های مورد مطالعه تفاوت نژادگانی قابل ملاحظه‌ای در رابطه با حساسیت به کمبود آهن مشاهده شد (جدول ۴). در این مطالعه دورگه‌های ذرت دانه‌ای به ویژه دورگه ۵۰۰ با وجود رشد و تولید ماده خشک بیشتر، حساسیت کمتری نشان داد، که کارآمدی این نژادگان در مصرف آهن را به خوبی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد هم‌افزایی رشد و افزایش سطح جذب توسط ریشه نقش مهمی در این رابطه داشته است. عواملی مانند توان بیشتر ریشه‌ها در کاهش  $Fe^{+2}$  به  $Fe^{+3}$  از طریق تولید  $H^+$  و یا آنزیم‌های کاهش دهنده آهن سه ظرفیتی ( $Fe^{3+}$ -Reductase)، برهمکنش کمتر با سایر عناصر، تولید کلات‌ها یا ترکیبات ذخیره‌ای و یا فرآیندهای شیمیایی-فتوشیمیایی داخلی که دسترسی به آهن و مصرف آن را



شکل ۴. برهمکنش آثار غلظت عنصر روی (صفر و ۲ میکرومولار از منبع سولفات روی) محلول غذایی و دورگه ذرت بر وزن خشک ریشه هر گیاه

### نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد، حساسیت دورگه‌های مورد مطالعه در این آزمایش به کمبود آهن در محلول غذایی بیش از کمبود روی بوده است. در این میان دورگه‌های ذرت دانه‌ای ۵۰۰ و ۷۰۰ نسبت به دورگه‌های ذرت شیرین ۴۰۳ و ۴۰۴ حساسیت کمتری به کمبود آهن و روی از خود نشان دادند. این امر با توجه به وضعیت رشد و کارآمدی وضعیت فتوسنتزی آنها که از طریق مقادیر بالاتر پارامترهای فلورسانس کلروفیل برگ مشهود است، قابل پیش بینی است. همچنین عنصر روی نقش بارزتری در توسعه و رشد ریشه در مقایسه با دورگه‌های مورد مطالعه داشت. از سوی دیگر برهمکنش بین عناصر آهن و روی محلول غذایی نیز در ایجاد برخی از صفات مهم دورگه‌های مورد مطالعه از جمله سطح برگ و وزن ریشه حایز اهمیت بوده و کمبود آهن در شرایط کفایت عنصر روی خسارات بیشتری ایجاد نموده است.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از زحمات و همکاری‌های آقای مهندس علی اشرفی در طول اجرای این طرح صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

تنظیم می‌کنند و یا سطح جذب بیشتر به واسطه توسعه ریشه در این امر دخیل اند (۲ و ۶). با توجه به نقش روی در استحکام و تنظیم نفوذپذیری غشای سلول‌های ریشه (۱۰) و جلوگیری از جذب یون‌های اضافی در محیط ریشه (۲۱) اثر بخشی افزایش روی محلول غذایی در بهبود وزن خشک ریشه قابل توجه است (جدول ۳). وجود برهمکنش بین روی و دورگه در حجم وزن خشک ریشه ذرت نیز حاکی از وجود تنوع نژادگانی بین دورگه‌های مورد مطالعه در زمینه مصرف روی است. هر چند الگوی رشد ریشه دورگه‌ها تحت تأثیر غلظت روی محلول غذایی قرار گرفت با این حال تحت هر دو شرایط کمبود و کفایت عنصر روی دورگه‌های ذرت دانه‌ای ۵۰۰ و ۷۰۰ حجم و ماده خشک ریشه بیشتری نسبت به دورگه‌های ذرت شیرین ۴۰۳ و ۴۰۴ تولید نمودند (شکل ۴). نکته قابل توجه دیگر در این مطالعه وجود برهمکنش بین غلظت آهن و روی محلول غذایی در رابطه با رشد برگ و ریشه دورگه‌های ذرت بود. به گونه‌ای که در مورد سطح برگ در شرایط کفایت عنصر روی، کمبود آهن خسارت بیشتری را نسبت به شرایط کمبود هم‌زمان آهن و روی محلول غذایی اعمال کرد. از سوی دیگر اثربخشی افزایش غلظت آهن در شرایط کفایت عنصر روی بر سطح برگ (شکل ۲) و ماده خشک ریشه (شکل ۳) بیشتر بود. این موضوع را می‌توان به وجود رابطه هم‌افزایی بین این دو عنصر در جهت رشد برگ نسبت داد.

## منابع مورد استفاده

۱. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۵. راهکارهای بهبود کیفیت گندم تولیدی در استان قم به منظور بهبود سلامت افراد جامعه. گزارش نهایی، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان قم، ایران.
۲. عشقی زاده، ح. ر.، ا. ح. خوشگفتارمنش، ع. اشرفی، ا. ح. معلم، ن. پورسخی، ن. پورقاسمیان، ا. میلادی و م. گرجی. ۱۳۸۷. آهن کارایی تعدادی از محصولات زراعی در محیط کشت محلول. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ویژه نامه علوم و فنون آب، خاک و منابع طبیعی ۱۲(۴۶): ۶۶۴-۶۵۵.
3. Andrews, J. R., M. J. Fryer, and N. R. Baker. 1995. Characterization of chilling effects on photosynthetic performance of maize crops during early season growth using chlorophyll fluorescence. *J. Exp. Bot.* 46: 1195-1203
4. Baker N. R. and E. Rosenqvist. 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *J. Exp. Bot.* 55 (403): 1607-1621.
5. Belkhdja, R., F. Morales, R. Qu'Ulez, A.F. L'opez-Mill'an, A. Abad'Ua and J. Abad'Ua. 1998. Iron deficiency causes changes in chlorophyll fluorescence due to the reduction in the dark of the Photosystem II acceptor side. *Photosynthesis Res.* 56: 265-276.
6. Bennett, J. H., E. H. Lee, D. T. Kirzek, R. A. Olsen and J. C. Brown. 1982. Photochemical reduction of iron. II. Plant related factors. *J. Plant Nutr.* 5: 335-344.
7. Bennett, J. H., R. A. Olsen and R. B. Clark. 1982. Modification of soil fertility by plant roots: Iron stress-response mechanism. *What's New in Plant Physiol.* 13(1):1- 4
8. Bohm, W. 1979. *Method of Studying Root Systems.* Springer-Verlag, New York.
9. Briat, J. F., I. Fobis-Loisy, N. Grignon, S. Lobre' aux, N. Pascal, G. Savino, S. Thoiron, N. Von Wire' n and O. Van Wuytswinkel. 1995. Cellular and molecular aspects of iron metabolism in plants. *Biol. Cell* 84: 69-81.
10. Cakmack, I. and H. Marschner. 1988. Increase in membrane permeability and exudation in roots of zinc deficiency plants. *J. Plant Physiol.* 132: 356-361.
11. Grafts-Brander, S. J. and M. E. Salvucci. 2002. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. *Plant Physiol.* 129:1773-1780.
12. Jolley, V. D. and J. C. Brown. 1989. Iron efficient and inefficient oats. I. Differences in phytosiderophore release. *J. Plant Nutr.* 12:423-435.
13. Khoshgoftar, A. H., H. Shariatmadari and N. Karimian. 2006b. Responses of wheat genotypes to zinc fertilization under saline soil conditions. *J. Plant Nutr.* 27(9):1-14.
14. Khoshgoftarmanesh, A. H., M. R. Balai and Z. Khademi. 2001. The effect of ZnSO4 on the growth and yield of wheat in saline-bare soils, In 7th Iranain Soil Science Congress, Univ. of Shahrekord: Shahr-e-kord, Iran, Sept. 14-21.
15. Macdonald, G. E., D. G. Shilling and T. A. Bewick. 1993. Effects of endothall and other aquatic herbicides on chlorophyll fluorescence, respiration and cellular integrity. *J. Aquat. Plant Manag.* 31: 50-55.
16. Mashner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants.* 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press., USA.
17. Masojidek, J., S. Trivedi, L. Halshaw, A. Alexiou and D. O. Hall. 1991. The synergistic effect of drought and light stresses in sorghum and pearl millet. *Plant Physiol.* 96:198-207.
18. Maxwell, K. and G. N. Johnson. 2000. Review article: Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *J. Exp. Bot.* 51: 659-668.
19. Mendoza, A.B. 1999. Absorption and Assimilation of iron in plant. Departamento De Horticultura, Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro. Translation by Roger Miller.
20. Moradi, F. and A. M. Ismail. 2007. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ROS-scavenging systems to salt stress during seedling and reproductive stages in rice. *Ann. Bot.* 99 (6): 1161-1173.
21. Rengel, Z. and V. Romheld. 2000. Differential tolerance to Fe and Zn deficiencies in wheat germplasm. *Euphytica*, 113: 219-225.
22. Singh, J. P., D. J. Dahiya and R. P. Narwat. 1990. Boron uptake and toxicity in wheat in relation to zinc supply. *Fert. Res.* 24. 105-110.
23. Strasser, B. J. 1997. Donor side capacity of Photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transients. *Photosynth. Res.* 52: 147-155.
24. Yamasaki, T., T. Yamakawa, Y. Yamane, H. Koike, K. Satoh and S. Katoh. 2002. Temperature acclimation of photosynthesis and related changes in photosystem II electron transport in winter wheat. *Plant Physiol.* 128: 1087-1097.