



اثرات به کارگیری پرتودهی بذر ذرت SC740 با امواج فراصوت در تقلیل اثرات تنش خشکی

مریم سالمی نسب^۱، منوچهر قلی پور^{۲*}، حسن مکاریان^۲، حسن آریانی محمدی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد اکولوژی کشاورزی دانشگاه شاهرود.

۲. اعضای هیئت علمی دانشگاه شاهرود.

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۰۷

چکیده

پرتودهی بذر با امواج فراصوت یک تکنولوژی جدید برای افزایش رشد و استقرار اولیه گیاهچه محسوب می شود. تاکنون، بیشتر آزمایش‌ها در این خصوص در مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ذرت انجام شده است. هدف از این آزمایش، مطالعه امکان تقلیل اثرات تنش خشکی بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیکی واریته SC740 ذرت در مراحل بعدی رشد و نمو بود. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در سال ۱۳۹۳ اجرا گردید. تیمارها شامل تنش خشکی [شاهد، تنش کوتاه مدت (قطع آبیاری از مرحله خمیری شدن دانه به بعد) و تنش بلندمدت (قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد)] و پرتودهی بذر (شاهد، ۲، ۴، ۶ و ۸ دقیقه) با امواج فراصوت بود. نتایج نشان داد که به‌غیر از در صد پروتئین دانه، اثر متقابل فاکتورها بر کلیه صفات شامل محتوای نسبی آب برگ، شاخص سطح برگ، محتوای پتا سیم برگ، محتوای قندهای محلول و کاروتنوئیدها و میزان بیومس گیاه و عملکرد دانه معنی‌دار نبود. این در حالی است که اثرات اصلی آن‌ها بر کلیه صفات معنی‌دار شد. مؤثرترین مدت پرتودهی، ۶ دقیقه بود که توانست میانگین بیومس و عملکرد دانه در هر دو شرایط وجود و عدم وجود تنش خشکی را به ترتیب ۱۳٪ و ۲۵٪ نسبت به شاهد افزایش دهد که نشانگر تقلیل اثرات تنش خشکی بر رشد و عملکرد است. این تأثیر می‌تواند ناشی از افزایش محتوای پتاسیم برگ (۱۴٪) و بیشتر نمودن غلظت قندهای محلول (۲۲٪) و در نتیجه بهتر شدن وضعیت آبی گیاه (۱۸٪ افزایش در محتوای نسبی آب برگ) باشد.

واژه‌های کلیدی: امواج، صفات فیزیولوژیک، کم آبیاری، عملکرد ذرت.

مقدمه

نمودند که پرتودهی بذرها به مدت ۵۰ تا ۶۰ ثانیه باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه به ترتیب به میزان ۴۰، ۳۲ و ۸-۵ درصد می‌گردد. تیمار بذر گیاه دارویی مورد (*Myrtus communis*) با امواج فراصوت علاوه بر شکستن خواب، باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه شده است (Alvandian et al., 2013). در مطالعه‌ای، تأثیر این امواج بر بذرهای فلفل دلمه‌ای و تربچه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر فلفل و تربچه به ترتیب در ۴ و ۷ دقیقه پرتودهی حاصل می‌شود (Fariabi et al., 2008).

امواج فراصوت دارای فرکانس ۲۰ تا ۲۵ کیلوهرتز بوده و جزو فرکانس‌های خارج از بازه شنوایی انسان گروه‌بندی می‌شوند. از این امواج در زمینه‌های مختلف از جمله صنعت (آزمون فلزات برای وجود گسستگی)، اصلاح نباتات (تسهیل انتقال ژن به سلول گیرنده)، صنایع غذایی (حذف قلیا در فرآیند تهیه کشمش) و به‌عنوان کمک فرآیند استخراج مواد مؤثره از گیاهان دارویی) استفاده‌های گسترده‌ای به عمل می‌آید (Barton et al., 1996). در کشاورزی، نتایج قابل توجه و امیدوارکننده‌ای در خصوص اهمیت راهبردی این امواج در تحت تأثیر قرار دادن رشد گیاهچه در دسترس است. به‌عنوان نمونه، فاریابی و همکاران (Fariabi et al., 2008) گزارش

امواج فراصوت و ۳ سطح تنش خشکی بر واریته SC740 ذرت بررسی گردید.

در پژوهش‌ها معمولاً با ایجاد تغییر در فواصل آبیاری، شدت‌های مختلف تنش‌های خشکی بر گیاه اعمال می‌گردد. در این بررسی، سعی شد که به صورت عملی‌تر به قضیه نگاه شود و پاسخ این سؤال مورد جستجو قرار گیرد که اگر در اواخر دوره رشد و نمو (از گلدهی به بعد و از خمیری شدن دانه به بعد)، کشاورز به هر دلیلی (حادث شدن اشکال فنی در سیستم پمپ و انتقال آب؛ یا تصمیم اختیاری برای قطع آبیاری مزرعه و استفاده از آن برای کشت پاییزه یک گیاه دیگر) بخواهد آبیاری مزرعه را قطع کند آیا در شرایط قطع آبیاری طولانی‌مدت (قطع آبیاری از گلدهی به بعد) عملکرد قابل برداشتی خواهد داشت؟ آیا در شرایط قطع آبیاری کوتاه‌مدت (قطع آبیاری از خمیری شدن دانه به بعد) افت عملکرد شدید خواهد بود؟ پرداختن به تنش خشکی از این زاویه از این نظر اهمیت می‌یابد که در این دوره‌ها، ذخیره آبی خاک کم می‌شود ولی به لحاظ خنک شدن هوا، نیاز آبی گیاه هم کاهش می‌یابد و همچنین احتمال هرچند ضعیف وقوع باران‌های سبک نیز وجود دارد.

مواد و روش‌ها

واریته مورد بررسی در این آزمایش، واریته SC740 بود. این واریته به لحاظ سازگاری با منطقه و برخورداری از عملکرد رضایت‌بخش، مورد اقبال کشاورزان می‌باشد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهرود در سال ۱۳۹۳ اجرا گردید. فاکتورها شامل ۳ سطح تنش خشکی [شاهد، تنش بلندمدت (قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد) و کوتاه‌مدت (قطع آبیاری از مرحله خمیری شدن دانه به بعد)] و ۵ مدت پرتودهی بذر با امواج فراصوت (شاهد، ۲، ۴، ۶ و ۸ دقیقه) با فرکانس ۴۲ کیلوهرتز بود. شایان‌ذکر است که اساس انتخاب سطوح پرتودهی، نتایج بررسی مبتنی بر آزمون و خطا بر روی ۴ گیاه از جمله ذرت بود. قبل از پرتودهی، برای اینکه فعالیت‌های جوانه‌زنی بذر شروع شده و تأثیر پرتودهی افزایش یابد، بذرها به مدت ۵ ساعت در آب خیسانده شدند. این زمان خیساندن نیز بر اساس آزمون و خطا به دست آمد. برای پرتودهی بذر از دستگاه پرتودهی (Digitaltrasonic مدل CD- 4820) استفاده

در ایران به‌عنوان کشوری خشک و نیمه‌خشک، تنش خشکی یکی از عوامل عمده کاهش رشد گیاهان می‌باشد. علت کاهش رشد در گیاهان تنش دیده، تغییرات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی می‌باشد. یکی از این تغییرات، تقلیل گشودگی روزنه‌ها و کاهش تبادلات گازی و غلظت CO₂ در بافت مزوفیلی است. در نتیجه این امر، واکنش‌های تاریکی فتوسنتز مختل شده و محصولات حاصل از واکنش‌های روشنایی که شامل ATP و NADPH است مصرف نمی‌شود در اصل، به دلیل عدم اکسیده شدن مولکول NADPH، مصرف NADP⁺ جهت دریافت الکترون کاهش می‌یابد. این امر منجر به تشکیل رادیکال‌های آزاد گشته و به دنبال آن، بر غشاهای سلولی آسیب وارد می‌شود (Mittler, 2002).

بیشتر مطالعات انجام شده در خصوص تأثیرات امواج فراصوت، به مرحله جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه معطوف شده است و نتایج منتشرشده در خصوص اثر آن بر رشد گیاه در مابقی مراحل رشد و نمو در دست نیست. با توجه به اثر مثبت پرتودهی بر ریشه‌دهی گیاهچه (Alvandian et al., 2013)، به نظر می‌رسد که شاید این عامل بتواند اثر تنش خشکی بر گیاه را بکاهد. این فرضیه بر این اصل استوار است که گیاه با ریشه‌دهی عمیق‌تر شاید بتواند از آب لایه‌های پایین‌تر خاک استفاده نماید. چون نسبت بالاتر ریشه به اندام هوایی بر بزرگ‌تر بودن اندام‌های جذب‌کننده آب نسبت به اندام‌های مصرف‌کننده دلالت دارد در نتیجه می‌تواند زمینه را برای اجتناب از تنش خشکی فراهم نماید (Krishnamurthy et al., 2003). شایان‌ذکر است که در غالب موارد، یک همبستگی مثبت بین نسبت ریشه به اندام هوایی در مراحل گیاهچه‌ای و مراحل بعدی رشد و نمو وجود دارد (Hussain et al., 2000; Gupta, 1984; Huang and Gao, 2000). به بیان دیگر، واریته‌هایی که از لحاظ ژنتیکی قادرند در مرحله گیاهچه‌ای از نسبت ریشه به اندام هوایی بالاتری برخوردار باشند می‌توانند این ویژگی را در مراحل بعدی رشد و نمو نیز حفظ نموده و مقاومت به خشکی بالاتری به اجرا بگذارند. در خصوص اینکه آیا تأثیر افزایش تیماری همچون پرتودهی بذر با امواج فراصوت بر افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی در مرحله گیاهچه‌ای می‌تواند در مراحل بعدی رشد و نمو گیاه نیز همچنان افزایش‌دهنده باشد، گزارش منتشرشده‌ای در دست نیست. برای بررسی صحت فرضیه فوق‌الذکر، یک آزمایش مزرعه‌ای اجرا گردید که در آن، تأثیر ۵ سطح پرتودهی بذر با

درجه آزادی این آزمون برابر با $n-2$ می‌باشد. یکی از محاسن این شاخص عبارت از این است که مشخص می‌نماید به ازای یک واحد (روز) افزایش در دوره تنش خشکی، چند واحد از کمیت صفت مورد بررسی تغییر می‌نماید. بدیهی است که با محاسبه نسبت کمیت صفت در شرایط وجود تنش نسبت به شرایط عدم وجود تنش نمی‌توان اطلاعات دقیق این چینی را به دست آورد.

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

در بین شاخص‌های روابط آبی از جمله پتانسیل آب گیاه و پتانسیل تورژسانس گیاه، محتوای نسبی آب برگ (RWC) به‌عنوان بهترین معیار اندازه‌گیری وضعیت آب گیاه معرفی شده است (Blum, 1999). یکی از علت‌های برتری RWC نسبت به پتانسیل آب عبارت از این است که تفاوت بین تیمارها را بهتر نشان می‌دهد؛ زیرا تیمارهایی که پتانسیل آب یکسانی را در گیاه باعث شده‌اند، در صورت فراهم کردن شرایط متفاوت تنظیم اسمزی، RWC یکسانی را در گیاه به دنبال نداشته و در نتیجه می‌توان اختلاف آن‌ها را از این نظر نشان داد (Blum, 1999). به‌طوری‌که در این جدول ۱ دیده می‌شود، اثرات اصلی تنش خشکی و پرتو دهی بذر بر RWC در سطح ۱٪ معنی‌دار شد ولی اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار به دست نیامد. میزان کاهش RWC بر اثر تنش کوتاه‌مدت (قطع آبیاری از زمان خمیری شدن دانه به بعد) و طولانی (قطع آبیاری از زمان گلدهی به بعد) نسبت به شاهد به ترتیب ۱۳٪ و ۱۹٪ بود که اختلاف بین دو سطح تنش خشکی از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۱). نرخ تأثیرپذیری RWC برابر با ۰/۲۵۲۲۰۹ بود که از نظر کمیت (بزرگی)، در مقایسه با صفات دیگر رتبه سوم را به خود اختصاص داد (جدول ۲). در بررسی‌های انجام شده بر گیاهان دیگر نیز تأثیر کاهشی تنش خشکی بر RWC ثابت شده (Sing and Sing, 1995) و یک همبستگی مثبت بین کاهش هدایت روزنه‌ای و تقلیل RWC به‌دست‌آمده است. افزایش مدت پرتو دهی تا ۶ دقیقه، RWC نیز به‌طور تقریباً متناسب بیشتر شد ولی پس‌از آن، کاهش نشان داد (شکل ۱). از نظر کمیت RWC، پرتو دهی ۶ دقیقه- ای بذر بهترین سطح بوده و افزایش ۱۸ درصدی را در آن به دنبال داشته است.

گردید. بلافاصله بعد از پرتو دهی، بذرها با فواصل ۱۵ سانتی-متر و فاصله ردیف ۶۵ سانتی‌متر کشت گردیدند.

برای سنجش شاخص سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ، محتوای کارتنوئید برگ، محتوای قندهای محلول برگ و محتوای پتاسیم برگ، اقدام به نمونه‌برداری در زمان ۱۰ روز بعد از اعمال تنش خشکی کوتاه‌مدت (۱۰ روز بعد از مرحله خمیری شدن دانه) شد. بعد از رسیدگی، میزان پروتئین دانه، بیومس اندام هوایی و عملکرد دانه محاسبه گردید. محتوای کارتنوئید و قندهای محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر به دست آورده شد. میزان پروتئین دانه به روش کج‌دال و محتوای پتاسیم برگ به روش فلیم فتومتری محاسبه گردید.

به‌منظور اندازه‌گیری شدت حساسیت صفات به تنش خشکی، از شاخص نرخ تأثیرپذیری (E) استفاده گردید که رابطه آن به شرح زیر است (Gelman and Hill, 2007):

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i Y_i) - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n (X_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}} \quad [1]$$

که در آن X متغیر مستقل (تنش خشکی) و Y متغیر وابسته (صفات گیاهی مورد سنجش) می‌باشند. مقیاس این شاخص عبارت است از واحد صفت نسبت به واحد تنش خشکی. برای مقایسه صفات مختلف با یکدیگر از لحاظ نرخ تأثیرپذیری، لازم است که انحراف استاندارد (S) این شاخص محاسبه گردد که رابطه آن به شرح زیر می‌باشد:

$$S = \sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=1}^n \left(Y_i \cdot \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(X_i \cdot \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right)} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i Y_i) - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n (X_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}} \right)^2}{n-2}} \quad [2]$$

در معادله بالا، i شماره نام متغیر و N تعداد مشاهدات می‌باشند. برای آزمون معنی‌دار بودن تک‌تک شاخص‌ها، از T-test استفاده گردید که با استفاده از نسبت زیر محاسبه - گردید:

$$T = \frac{E}{S} \quad [3]$$

جدول ۱. میانگین مربعات صفات مورد مطالعه گیاه ذرت در شرایط تنش خشکی و امواج فراصوت.

Table 1. Meansquares of studied traits of corn under drought and ultrasound conditions.

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد دانه	بیوماس	کاروتنوئید	محتوای نسبی آب	پروتئین	قندهای محلول	پتاسیم	شاخص سطح برگ
Source of variations	df	Seed yield	Biomass	Carotenoid	RWC	Protein	Soluble Sugars	K ⁺	LAI
تکرار	2	0.39	3.43	0.01	0.062	2.12	678	1309	1224
Replication									
تنش خشکی	2	6.26**	3.01*	1.30*	0.069**	0.93*	488**	13162**	4199**
Drought (D)									
فراصوت	4	8.11**	8.09**	0.01 ^{ns}	0.025**	4.04**	940**	2318**	110 ^{ns}
Ultrasound (U)									
D*U	8	0.51 ^{ns}	1.71 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.003 ^{ns}	1.33**	393 ^{ns}	397 ^{ns}	74 ^{ns}
Error	خطا	28	0.39	0.85	0.03	0.32	221	329	128

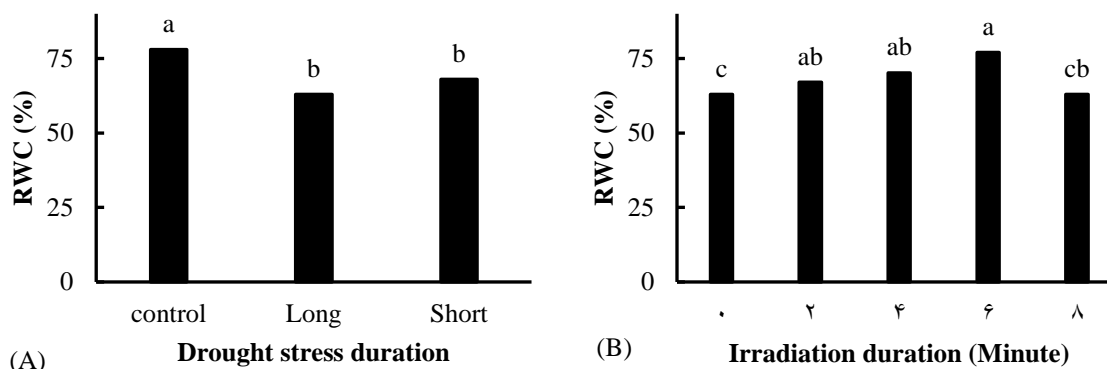
^{ns}, * و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد.

ns, * and **: Non significant, significant at 5 and 1% probability level, respectively.

جدول ۲. کمیت شاخص نرخ تأثیر پذیری و آماره‌های مرتبط با آن برای برخی صفات ذرت.

Table 2. The quantity of sensitivity rate index and relevant statistics for some traits of corn.

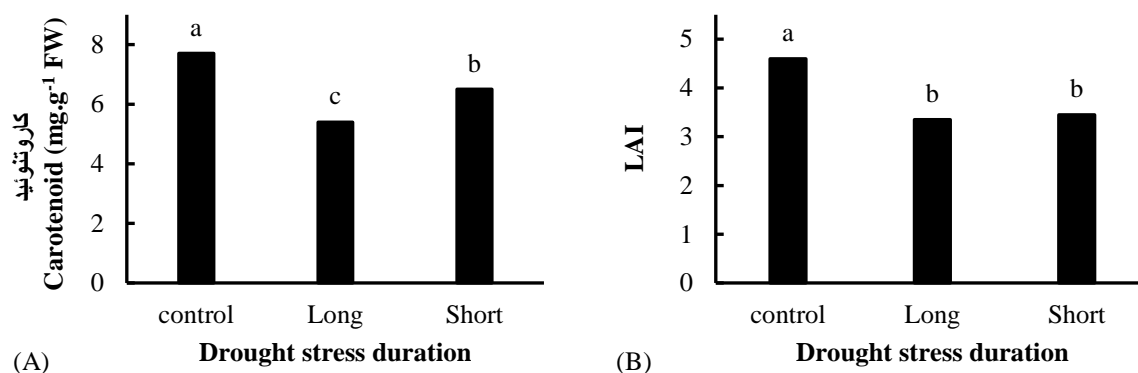
Trait	صفت	نرخ تأثیر پذیری	خطای استاندارد	مقدار T	سطح احتمال
		Sensitivity index	Standard error	T value	Probability level
LAI	شاخص سطح برگ	0.021484	0.01319373	6.727	0.0003
Seed yield	عملکرد دانه	0.03775	0.010040735	92.673	0.0001
Carotenoid	کاروتنوئید	0.043373	0.01119283	224.928	0.0001
Biomass	بیومس کل	0.082165	0.01035642	11.169	0.0001
RWC	آب نسبی برگ	0.252209	0.01004662	23.252	0.0001
Soluble sugar	قندهای محلول	0.427143	0.01048176	57.091	0.0001
K content	پتاسیم	0.983796	0.01454652	67.631	0.0001



شکل ۱. تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی (کوتاه: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد؛ طولانی: قطع آبیاری از مرحله گلدی به بعد) و امواج فراصوت (B) بر محتوای نسبی آب برگ (RWC) ذرت.

Fig. 1. The effect of drought stress levels (short: no irrigation from grain dough stage onward; long: no irrigation from flowering stage onward) on relative water content (RWC) of corn.

بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته باشد تا سطح برگ. به طور کلی، در شرایط تنش خشکی میزان رطوبت مورد نیاز جهت رشد و تولید در گیاه کاهش یافته و این امر منجر به افزایش پیری برگ‌ها (تقلیل LAI) می‌شود. اعتقاد بر این است که در برگ نسبت به اندام‌های دیگر گیاه، تقسیم سلولی به تنش خشکی حساس‌تر می‌باشد (Chisti, 2002). نرخ تأثیرپذیری این صفت برابر با 0.21484 به دست آمد (جدول ۲).



شکل ۲. تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی (کوتاه: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد؛ طولانی: قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد) بر محتوای کاروتنوئید (A) و شاخص سطح برگ (LAI) (B) در ذرت.

Fig. 2. The effect of drought stress levels (short: no irrigation from grain dough stage onward; long: no irrigation from flowering stage onward) on carotenoid content (A) and LAI (B) of corn.

است و (۲) گیاه با افزایش جذب پتاسیم و بیشتر نمودن محتوای آن در برگ‌های خود سعی در تطابق با تنش خشکی داشته است چون بر اساس گزارش زانگ و همکاران (Zhang et al., 2008)، افزایش میزان پتاسیم در برگ باعث بهبود فعالیت فتوسنتزی، افزایش تولید پروتئین، قند محلول و ترکیبات تعدیل‌کننده پتانسیل اسمزی گشته و در نهایت، افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی را فراهم می‌کند. این صفت بالاترین نرخ تأثیرپذیری را به خود اختصاص داد (جدول ۲). پرتو دهی بذر باعث افزایش محتوای پتاسیم برگ گردید (شکل ۳). بیشترین تأثیر مربوط به ۶ دقیقه پرتو دهی بود که افزایش ۱۴ درصدی محتوای این عنصر را به دنبال داشت.

غلظت قند محلول در برگ

اثرات اصلی تنش خشکی و پرتو دهی بر این صفت معنی‌دار شد ولی اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار به دست نیامد (جدول ۱).

شاخص سطح برگ

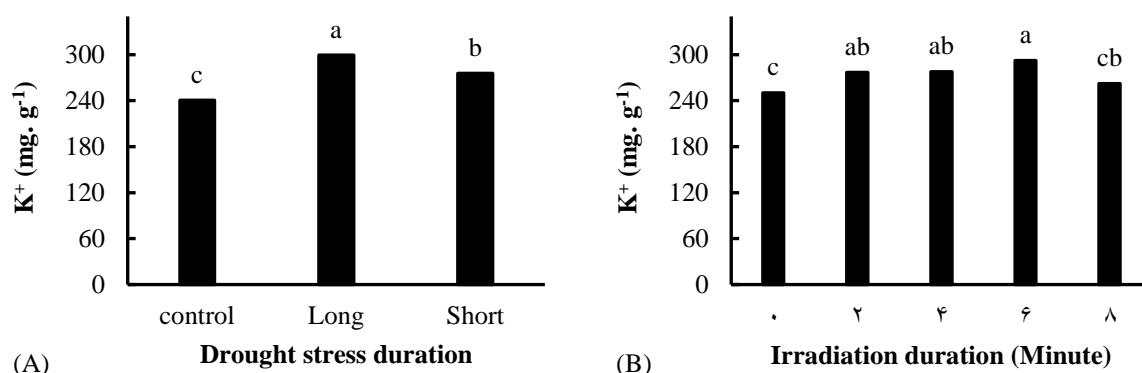
این صفت (LAI) تنها به طور معنی‌داری از تنش خشکی تأثیر پذیرفت (جدول ۱). اثرات کاهش تنش کوتاه و بلندمدت بر این صفت به ترتیب حدود ۲۵ و ۲۷٪ بود (شکل ۲). شایان ذکر است که از نظر آماری، بین این دو سطح تنش، تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. از این رو به نظر می‌رسد که ضخامت برگ

محتوای پتاسیم برگ

این صفت در سطح احتمال ۱٪، تحت تأثیر تنش خشکی و پرتو دهی بذر قرار گرفت (جدول ۱). در مقابل، برهمکنش این فاکتورها معنی‌دار نشد که نشان‌دهنده این واقعیت می‌باشد که با تغییر سطح تنش خشکی، اثر پرتو دهی از لحاظ آماری تغییر نمی‌کند. بیشترین محتوای پتاسیم برگ در تنش خشکی طولانی مدت (۲۹۹/۳۳ میلی‌گرم بر گرم) و کمترین مقدار آن در شاهد (۲۴۰/۴۸ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده گردید. محتوای پتاسیم برگ گیاهان تنش دیده از مرحله خمیری شدن دانه به بعد، حدود ۱۵٪ بالاتر از شاهد شد (شکل ۳). با در نظر گرفتن نقش کلیدی پتاسیم در کنترل گشودگی روزنه‌ها، اگر در خاک پتاسیم کافی وجود نداشته نباشد، صدمات تنش بیشتر خواهد شد (Zhang et al., 2008). افزایش این عنصر در شرایط تنش خشکی این آزمایش، دو نکته را گوشزد می‌نماید: (۱) در خاک مورد استفاده در این آزمایش کمبود پتاسیم وجود نداشته

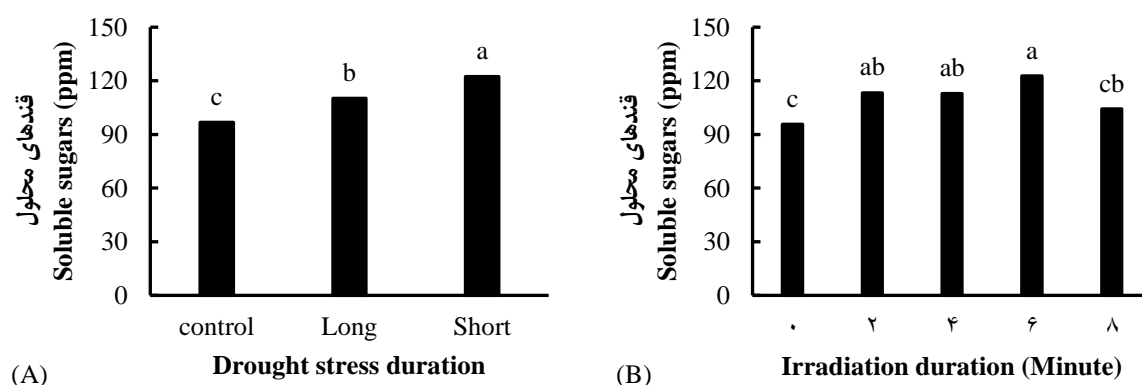
تبادل آن‌هاست (Chisti, 2002). قندهای محلول، ثبات دهنده غشاهای سلولی بوده و به‌عنوان حفظ‌کننده تورژسانس سلول‌ها عمل می‌کنند. در حقیقت در گیاهانی که در پاسخ به تنش خشکی، تجمع قند محلول خود را بالا می‌برند، از تنظیم اسمزی بهتری برخوردار می‌شوند (Chisti, 2002). پرتودهی بذر باعث شد که برگ‌های گیاه از قندهای محلول بالاتری برخوردار شود (شکل ۴). بالاترین تأثیر (۲۲٪) مربوط به ۶ دقیقه پرتودهی بود.

بیشترین غلظت قند محلول در برگ (۱۲۲/۴۱ پی‌پی‌ام) برای شرایط تنش کوتاه‌مدت و کمترین مقدار آن (۹۶/۶۹ پی‌پی‌ام) در شاهد مشاهده گردید. این صفت رتبه دوم را از لحاظ نرخ تأثیرپذیری از خود نشان داد (جدول ۲). در شرایط تنش خشکی، تنظیم‌کننده‌های اسمزی از جمله قندهای محلول برگ می‌توانند قدرت جذب آب از خاک توسط ریشه را افزایش دهند. از آنجایی‌که فتوسنتز و رشد هر دو تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرند، بنابراین تجمع مواد محلول تحت تأثیر



شکل ۳. تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی (کوتاه: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد؛ طولانی: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد) و امواج فراصوت (B) بر محتوای پتاسیم برگ (K⁺) در ذرت.

Fig. 3. The effect of drought stress levels (short: no irrigation from grain dough stage onward; long: no irrigation from flowering stage onward) on K content of leaf in corn.



شکل ۴. تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی (کوتاه: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد؛ طولانی: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد) و امواج فراصوت (B) بر قندهای محلول در ذرت.

Fig. 4. The effect of drought stress levels (short: no irrigation from grain dough stage onward; long: no irrigation from flowering stage onward) on content of soluble sugar in corn.

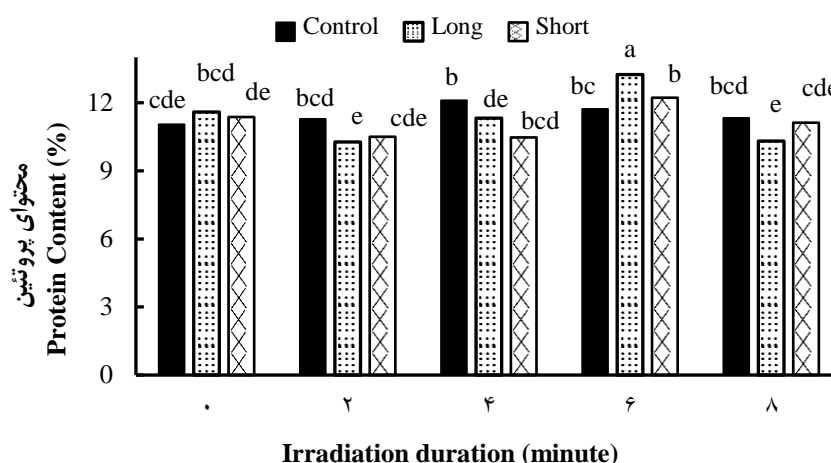
محتوای کاروتنوئید برگ

این صفت تنها تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین مقدار کاروتنوئید در شاهد (۷/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کمترین مقدار آن در تنش طولانی (۵/۱۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. در شرایط تنش کوتاه‌مدت، مقدار این صفت ۱۶٪ کمتر از شاهد بود (شکل ۲). این صفت جزو صفات با نرخ تأثیرپذیری کم بود (جدول ۲). کاروتنوئیدها به‌عنوان گیرنده‌های نوری مکمل در برگ عمل نموده و حفاظت از کلروفیل‌ها در برابر رادیکال‌های آزاد را به عهده‌دارند. به هنگام مواجهه گیاه با تنش‌های محیطی، مقدار آن‌ها افزایش یافته اما با گذشت زمان و افزایش تطابق گیاه با تنش، میزان آن‌ها کاهش پیدا می‌کند (Young, 1991). بر همین اساس به نظر می‌رسد کاهش بیشتر کاروتنوئیدها در شرایط تنش طولانی نسبت به تنش کوتاه‌مدت، ناشی از بیشتر شدن تطابق گیاه به تنش خشکی باشد.

محتوای پروتئین دانه

طبق نتایج تجزیه واریانس، علاوه بر اثرات اصلی، برهمکنش فاکتورها بر محتوای پروتئین دانه نیز معنی‌دار شد. این حالت

نشان‌دهنده این واقعیت است که در سطوح مختلف پرتودهی بذر، تأثیر تنش خشکی بر محتوای پروتئین دانه یکسان نیست. این امر را می‌توان در شکل ۵ نیز به‌خوبی مشاهده نمود. به‌عنوان نمونه، در بذره‌های پرتودهی شده به مدت ۲ و ۸ دقیقه، محتوای پروتئین دانه گیاهان تنش دیده کمتر از گیاهان تنش ندیده بود. در شرایط ۶ دقیقه پرتودهی عکس این حالت وجود داشت. بر همین اساس، نرخ تأثیرپذیری آن محاسبه نگردید. بالاترین درصد پروتئین دانه، در شرایط تنش بلندمدت و پرتودهی ۶ دقیقه حاصل گردید. به‌طور کلی، در شرایط تنش خشکی بخصوص در مرحله پر شدن دانه به‌واسطه کاهش طول دوره پر شدن دانه، کاهش فتوسنتز خالص و به‌تبع آن تکمیل نشدن وزن بالقوه دانه که عمدتاً ناشی از کاهش نشاسته می‌باشد، نسبت پروتئین به نشاسته در دانه افزایش و در واقع درصد پروتئین در دانه افزایش می‌یابد (Ahmadi and Baker, 2000). نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که فرآیندهای بیوشیمیایی سنتز نشاسته در دانه، حساس‌تر از فرآیندهای بیوشیمیایی سنتز پروتئین هستند (Wang et al., 2002).



شکل ۵. برهمکنش تنش خشکی (کوتاه: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد؛ طولانی: قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد) و امواج فراصوت محتوای پروتئین دانه در ذرت.

Fig. 5. The interactive effect of ultrasound and drought stress (short: no irrigation from grain dough stage onward; long: no irrigation from flowering stage onward) on grain protein content of corn.

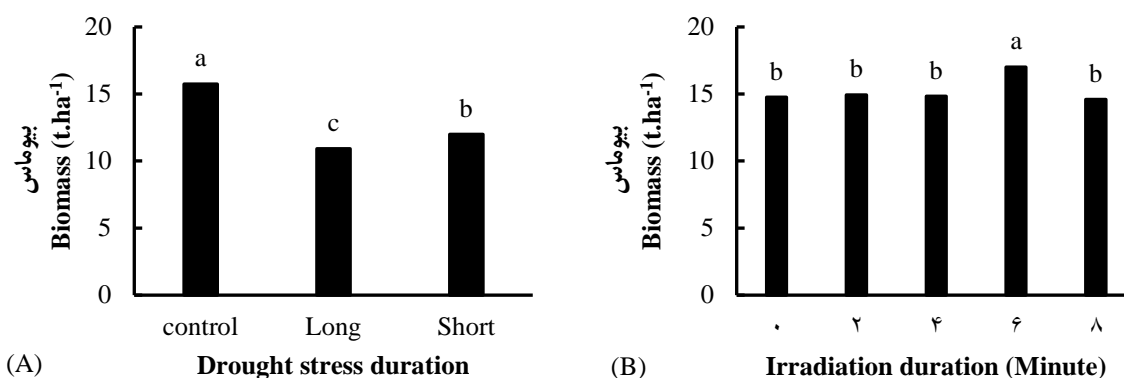
بیوماس گیاه

تولید ماده خشک گردد (Tabatabae et al., 2011). در بین سطوح پرتودهی، تنها اثر ۶ دقیقه پرتودهی بر بیوماس معنی-دار شد (شکل ۶) و توانست آن را به میزان ۱۳٪ افزایش دهد.

عملکرد دانه

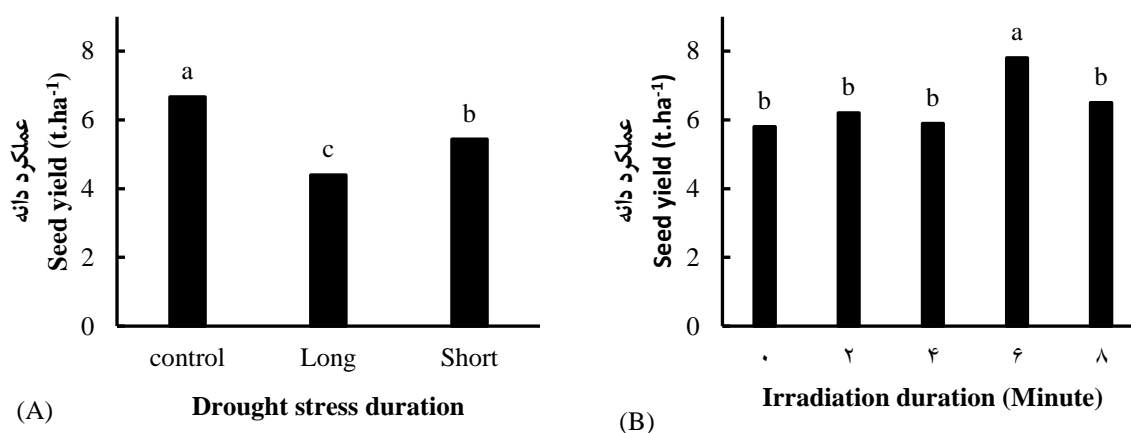
برخلاف، اثرات اصلی تنش خشکی و پرتودهی، برهمکنش این فاکتورها بر عملکرد دانه معنی‌دار به دست نیامد (جدول ۱). به‌طور مورد انتظار، کمترین عملکرد دانه در شرایط تنش طولانی حاصل شد (شکل ۷). در این شرایط عملکرد دانه به میزان ۳۴٪ پایین‌تر از شاهد بود. در شرایط تنش کوتاه‌مدت، تأثیر کاهشی تنش خشکی، برابر با ۱۸٪ به دست آمد. نرخ تأثیرپذیری این صفت کم بود (جدول ۲).

این صفت، تحت تأثیر اثرات اصلی تنش خشکی و پرتودهی قرار گرفت ولی برهمکنش آن‌ها، تأثیر معنی‌داری بر این صفت به‌جای نگذاشت (جدول ۱). کاهش بیوماس در اثر تنش خشکی کوتاه و بلندمدت به ترتیب برابر با ۲۴٪ و ۳۱٪ بود (شکل ۶). رتبه بیوماس از لحاظ کمیت نرخ تأثیرپذیری، چهارم شد (جدول ۲). یکی از علت‌های تفاوت کم بین سطوح تنش خشکی شاید مربوط به یک بارش سبک در شهریورماه در محل اجرای طرح باشد. بیشتر بودن بیوماس در شاهد (آبیاری کافی) می‌تواند به دلیل گسترش بیشتر و تداوم بهتر سطح برگ گیاه باشد که به‌واسطه آن، موجب قوی شدن منبع فیزیولوژیکی جهت استفاده هر چه بیشتر از نور دریافتی و



شکل ۶. تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی (کوتاه: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد؛ طولانی: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد) (A) و امواج فراصوت (B) بر بیوماس ذرت.

Fig. 6. The effect of drought stress levels (short: no irrigation from grain dough stage onward; long: no irrigation from flowering stage onward) on the biomass of corn.



شکل ۷- تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی (کوتاه: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد؛ طولانی: قطع آبیاری از مرحله خمیری دانه به بعد) (A) و امواج فراصوت (B) بر عملکرد دانه ذرت.

Figure 7- The effect of drought stress levels (short: no irrigation from grain dough stage onward; long: no irrigation from flowering stage onward) on the seed yield of corn.

داده نشده است، (۲) کاهش اتلاف آب از طریق تبخیر به واسطه بیشتر شدن سایه‌اندازی گیاه زراعی بر خاک و در نتیجه افزایش آب قابل تعرق، (۳) غالبیت گیاه زراعی بر علف‌های هرز، (۴) افزایش کارایی مصرف آب به لحاظ پایین‌تر بودن کمبود فشار بخار آب در اوایل فصل رشد (Soltani et al., 2002) و (۵) ریشه‌دهی عمیق‌تر و به تبع آن، افزایش دسترسی گیاه به آب لایه‌های پایین‌تر خاک. حصول RWC بالاتر برای گیاهان روئیده از بذرها پرتودهی شده به مدت ۶ دقیقه شاید نشانگر نهاده‌ی شدن فایده پنجم در این آزمایش باشد. به علاوه، افزایش جذب پتاسیم در اثر افزایش احتمالی عمق نفوذ ریشه باعث بیشتر شدن امکان تعدیل اسمزی و همچنین تنظیم سریع‌تر گشودگی روزنه‌ها باشد. البته غلظت بالاتر قندهای محلول در شرایط پرتودهی ۶ دقیقه نیز می‌تواند بر تعدیل اسمزی بالاتر دلالت داشته باشد. در بررسی عبادی و همکاران (Ebadi et al., 2013) نیز، پرتودهی باعث افزایش محتوای کلروفیل برگ و عناصر معدنی دانه لوبیا چشم‌بلبلی شده است.

اثر متقابل تنش خشکی و پرتودهی بر برخی صفات معنی‌دار نشد. این امر نشان می‌دهد که تأثیر افزایش پرتودهی بر برخی صفات، در همه سطوح تنش خشکی از جمله شاهد (بدون تنش خشکی)، از لحاظ آماری مشابه است. به بیان دیگر، اثر مثبت پرتودهی به مدت ۶ دقیقه می‌تواند کمیت آن صفات را در هر دو شرایط وجود و عدم وجود تنش خشکی افزایش دهد. افزایش رشد و عملکرد دانه گیاهان تنش دیده نشانگر تقلیل اثر کاهشی تنش خشکی می‌باشد. متوسط افزایش بیومس کل و عملکرد دانه در اثر پرتودهی ۶ دقیقه‌ای به ترتیب ۱۳٪ و ۲۵٪ بود. این امر شاید مربوط به افزایش متوسط ۲۸٪ قندهای محلول و ۱۷٪ محتوای پتاسیم برگ باشد. در بین صفات، محتوای پتاسیم برگ تأثیرپذیرترین صفات از تنش خشکی شناخته شد.

کاهش عملکرد در گیاهان در زمان تنش خشکی می‌تواند به این دلیل باشد که در زمان بروز تنش، میزان مواد فتوسنتزی صادرشده از برگ‌ها کاهش می‌یابد، زیرا انتقال شیره پرورده از آوندهای آبکش، وابسته به پتانسیل فشار است که در طی تنش کم‌آبی، پتانسیل آب در آوند آبکش کاهش یافته و منجر به تقلیل انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های ذخیره‌ای نظیر دانه می‌گردد (Bagheri and Hedaresharefabad, 2007). این تغییرات ممکن است به صورت کاهش تعداد دانه در بلال و تقلیل وزن ۱۰۰۰ دانه بروز نماید (Tabatabae et al., 2011). در شرایط پرتودهی بذر به مدت ۲، ۴ و ۸ دقیقه، عملکرد دانه همانند شاهد بود ولی در شرایط ۶ دقیقه پرتودهی، عملکرد دانه ۲۵٪ بیشتر از شاهد شد (شکل ۷).

نتایج منتشرشده در خصوص تأثیر امواج فراصوت بر گیاه بالغ در دست نیست که بتوان بر اساس آن‌ها، علت‌های فیزیولوژیکی تأثیر افزایش پرتودهی بر برخی از صفات اشاره‌شده در بالا را مورد بحث قرار داد. ولی آنچه قابل تأمل است، تأثیر قابل توجه پرتودهی بر رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه است که در گزارش‌های زیادی از جمله بارتون و همکاران (Barton et al., 1996) به آن اشاره شده است. مکانیسم تأثیر این امواج به ایجاد تغییر در غشای پلاسمایی و تسهیل ورود و خروج آب و عناصر معدنی به سلول ارتباط داده شده است (Risica et al., 2007). افزایش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز و در نتیجه بیشتر شدن سرعت هیدرولیز نشاسته نیز از اثرات پرتودهی به شمار می‌رود (Machikowa et al., 2013). در اثر پرتودهی، ترک‌های میکروسکوپی در پوسته بذر ایجاد می‌گردد که این امر تسهیل جذب آب را به دنبال دارد (Yaldagard et al., 2008). رشد قوی‌تر گیاهچه و استقرار بهتر آن فواید زیادی دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: (۱) افزایش جذب تشعشع خورشید به خصوص در اوایل فصل رشد (بهار) که نسبت قابل توجهی از زمین توسط کانوپی پوشش

منابع

- Ahmadi, A., Baker, D.A., 2000. The effect of water stress on grain filling processes in wheat. *Agricultural Science Journal*. 136, 257-269.
- Alvandian, S., Vahedi, A., Taghizadeh, R., 2013. Study the effect of ultrasound and chilling on germination of seeds of *Myrtus communis*. *Journal of Seed Research*. 3, 21-31 [In Persian with English Summary].
- Awada, T., 2002. Stomatal variability of native warm-season grasses from the Nebraska Sandhills. *Canadian Journal of Plant Sciences*. 82, 349-355.

- Bagheri, A., Hedaresharefabad, H., 2007. Evaluation of drought stress on yield and yield components of barley (*Hordeum sativum* L.). *Journal of Modern Agriculture*. 7, 1-15.
- Barton, S., Bullock, C., Weir, D., 1996. The effects of ultrasound on the activities of some glucosidase enzymes of industrial importance. *Enzyme and Microbial Technology*. 18, 190-194.
- Blum, A., 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*. 20, 135-148. In: E. Belhassen, (Ed). *Drought tolerance in Higher Plants: Genetical, Physiological and Molecular Biological Analysis*. Kluwer Academic Publishers.
- Chisti, Y., 2002. Sonobioreactors: Using ultrasound for enhanced microbial productivity. *Trends in Biotechnology*. 21, 89-93.
- Ebadi, S., Gholipoor, M., Gholami, A., 2013. Effect of ultrasound and nitroxin biological fertilizer on growth, yield and yield components of cowpea (*Vigna sinensis* L.). Abstracts of 2nd national symposium of sustainable development of agriculture and healthy environment. Aug. 27-28, Hamedan, Iran. [In Persian].
- Fariabi, A., Rasmanesh, H., Keshvari, M., Abdali, N., 2008. Effect of ultrasound on physiological and morphological processes of germination in *Capsicum annum* and *Rhaphnus sativus*. Abstracts of the 1st Iranian Congress of Seed Sciences and Technology. College of Agriculture, University of Gorgan, Gorgan. [In Persian].
- Gelman A., Hill, J., 2007. *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models* (1st Edition). Cambridge University Press.
- Gupta, U.S., 1984. Crop improvement for drought resistance. *Current Agriculture*. 8, 1-15.
- Huang, B., Gao, H., 2000. Root physiological characteristics associated with drought resistance in tall fescue cultivar. *Crop Science*. 40, 196-203.
- Hussain, M.M., Reid, J.B., Othman, H., Gallagher, Y.N., 2000. Growth and water use of faba beans (*Vicia faba*) in a sub-humid climate. I. Root and shoot adaptation to drought stress. *Field Crops Research*. 23, 1-17.
- Krishnamurthy, L., Kashiwagi, J., Upadhyaya, H.D., 2003. Genetic diversity of drought avoidance root traits in the mini-core germplasm collection of chickpea. *International Chickpea and Pigeonpea Newsletters*. 10, 21-24.
- Machikowa, T., Kulrattanak, T., Wonprasaid, S., 2013. Effects of ultrasonic treatment on germination of synthetic sunflower seeds. *International Journal of Agricultural, Biosystems Science and Engineering*. 7, 1-3.
- Mittler, R., 2002. Oxidative stress, antioxidant and stress tolerance. *Annual Review of Plant Sciences*. 7, 405-415.
- Risca, I.M., Fartais, L., Stiuca, P., 2007. Ultrasound effects contributions on the Norway spruce seeds germination (*Picea abies* (L.) Karsten). *Australian Journal of Crop Sciences*. 8, 87-88.
- Singh, B.R., Singh, D.P., 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research*. 42, 57-67.
- Soltani, A., Galeshi, S., 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment: Experimentation and simulation. *Field Crops Research*. 77, 17-32.
- Tabatabae, S.A., Shakeri, A., Shahede, M., 2011. Effect of water stress on yield, yield components and oil content in canola (*Brassica napus* l.). *Journal of Crop Physiology*. 3, 41-53.
- Wang, X., Wang, B., Jia, Y., Duan, C., Akio, S., 2002. Effect of sound wave on the synthesis of nucleic acid and protein in *Chrysanthemum* Colloids and surfaces. B: *Biointerfaces*. 29, 99-102.
- Yaldagard, M., Mortazavi, S.A., Tabatabaie, F., 2008. Influence of ultrasonic on the germination of barley seed and its alpha-amylase. *African Journal of Biotechnology*. 7, 2456-2471.
- Young, A.J., 1991. The photoprotective role of carotenoids in higher plants. *Plant Physiology*. 83, 702-708.
- Zhang, Y., Aijun, J., Tangyuan, N., Xud, J., Zengjia, L., Gaoming, J., 2008. Potassium nitrate application alleviates sodium chloride stress in winter wheat cultivars differing in salt tolerance. *Journal of Plant physiology*. 165, 1455-1465.