

حفظ تمامیت غشا و تحریک سامانه آنتی اکسیدان گیاه گندم تحت تأثیر میدان مغناطیسی ایستا و متناوب در فاز رویشی

عاطفه پایز^۱، فائزه قناتی^{۱*}، مهرداد بهمنش^۱، پرویز عبدالمالکی^۱ و مینا قهرمانی نژاد^۱

^۱دانشکده علوم زیستی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۲/۰۲/۱۴)

چکیده:

مطالعات زیادی نشان داده‌اند که میدان مغناطیسی می‌تواند روی موجودات زنده تأثیر بگذارد. با این وجود مکانیسم دقیق این تأثیرها هنوز نامشخص است. یک توصیف ممکن برای اثرات متعدد میدان مغناطیسی روی موجودات زنده، تنش اکسیداتیو ناشی از افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن است که با میانجی‌گری آهن انجام می‌گیرد. در این مطالعه اثر میدان‌های مغناطیسی ایستا (۳۰ میلی‌تسلا) و متناوب (۱۰ کیلوهرتز) بر رشد طولی، فعالیت سامانه آنتی اکسیدان، تمامیت غشا و میزان کلسیم و آهن کل در مرحله رویشی گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مقایسه با گیاهان شاهد، میدان مغناطیسی باعث افزایش فعالیت سامانه آنتی اکسیدان، حفظ تمامیت غشا و تغییر معنی‌دار یون‌های کلسیم و آهن در گیاه گندم می‌شود که این تغییرات بستگی به عوامل زیادی دارد که نوع میدان مغناطیسی و اندام مورد مطالعه از جمله آنها می‌باشد.

کلمات کلیدی: تنش اکسیداتیو، کلسیم، گندم، میدان مغناطیسی ایستا، میدان مغناطیسی متناوب

مقدمه:

مغناطیسی (Magnetic Field; MF) را بر رشد گیاهان نشان داده است. به عنوان مثال تأثیر کاهشی میدان‌های مغناطیسی ایستا بر رشد گیاه ریحان و القای مرگ سلولی در سلول های جدا کشت توتون نشان داده شده است (Ghanati et al., 2007; Abdolmaleki et al., 2007). همچنین تأثیر منفی میدان مغناطیسی ضعیف با دامنه شدت ۱۰۰ نانوتسلا تا ۵ میلی‌تسلا بر جوانه زنی دانه‌ها، رشد ریشه‌های اولیه دانه‌رست گیاهان، تقسیم سلولی در مریستم های ریشه گیاهان مشاهده شده است (Kato et al., 1989). در سطح آنزیمی نیز نشان داده شده است که پس از تیمار با میدان‌های مغناطیسی، فعالیت آنزیم‌هایی چون فیل آلانین آمونیا لیاز (PAL)، سوپر اکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز

تیمارهای فیزیکی با القای انرژی به سلول، شرایطی را برای نقل و انتقالات مولکولی ایجاد می‌کنند. میدان‌های مغناطیسی یکی از این تیمارهای فیزیکی است که می‌تواند بر عملکرد بسیاری از سلول‌ها تأثیر بگذارد؛ با این وجود مکانیسم دقیق عمل آنها هنوز مشخص نشده است (Hajnorouzi et al., 2011). تحریک گیاهان با استفاده از میدان‌های مغناطیسی می‌تواند راهی جهت افزایش کیفیت و کمیت عملکرد باشد و در عین حال با جلوگیری از مصرف زیاد سموم و کود، میزان آنها را در مواد خام گیاهی کاهش داده و باعث افزایش سلامت غذا و محیط گردد (Aladjajiyan, 2007). برخی بررسی‌ها تأثیر کاهنده میدان

*نویسنده مسئول، نشانی پست الکترونیکی: ghangia@modares.ac.ir

(CAT) و پراکسیداز (PO) تحت تأثیر قرار می گیرد (Pandolfini et al., 1992).

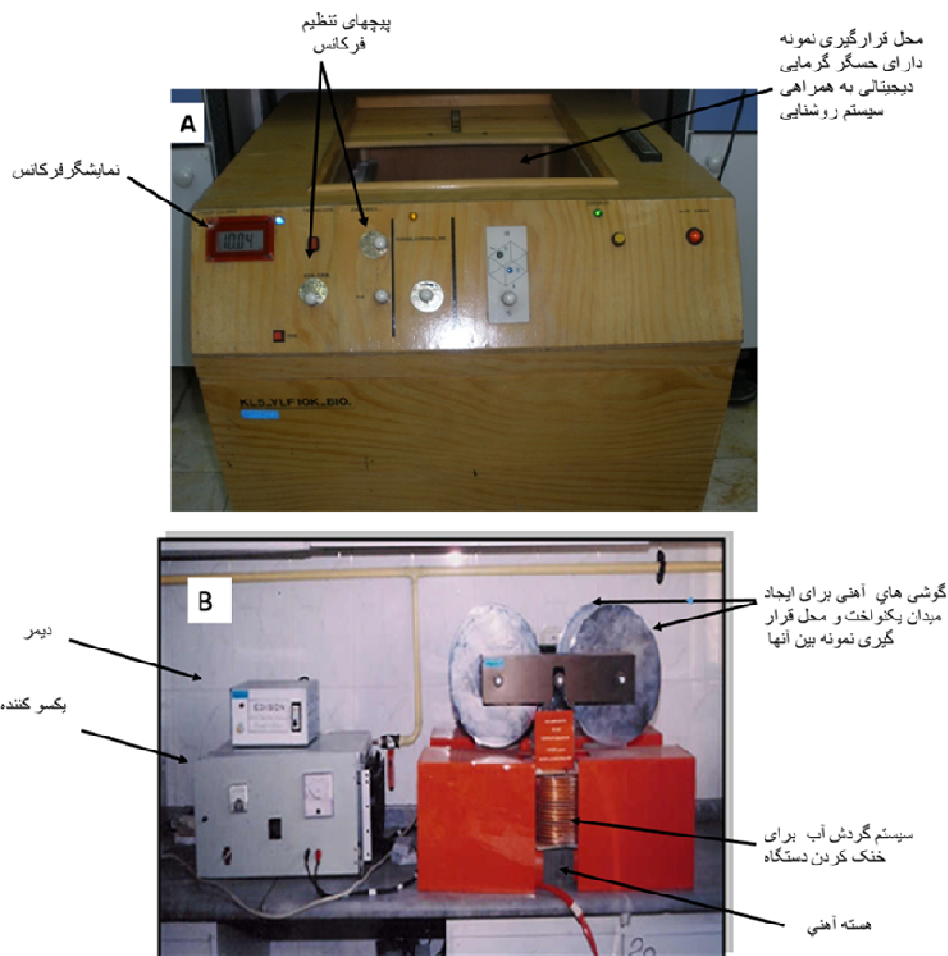
در این میان، برخی تحقیقات نیز اثرات مثبت میدان مغناطیسی را بر جوانه زنی بذر و پارامترهای رشدی را نشان داده است. محققین گزارش کرده‌اند که سرعت جذب آب و جوانه‌زنی در بذر کاهوی در معرض میدان مغناطیسی 1-10 mT افزایش می‌یابد (Garcia and Arza, 2001). آنها بیان نمودند که برهم‌کنش میدان مغناطیسی با جریان‌های یونی موجود در غشای سلول‌های رویان باعث ایجاد تغییراتی در غلظت یونی و فشار اسمزی در هر دو طرف غشا شده و موجبات تغییر روابط آب در بذر را فراهم می‌سازد. میدان مغناطیسی مناسب باعث کاهش pH دیواره سلولی، از بین رفتن خواب بذر، تأثیر بر متابولیسم سلول‌های مریستمی، افزایش جذب و تثبیت (assimilation) عناصر غذایی و بهبود فعالیت‌های فتوسنتزی می‌شود (Kavi, 1977). به نظر می‌رسد تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر بعضی فرآیندهای زیستی در گیاه، از طریق تأثیر آن بر سرعت و جهت جایگزینی ذرات قطبی آلی و معدنی در گیاه انجام گیرد (Kordas, 2002). اخیراً تحقیقی نشان داده است که میدانی مرکب از میدان مغناطیسی زمین و یک میدان الکترومغناطیسی ضعیف سبب رشد بهتر دانه‌رست‌های ذرت گردید. این تأثیر از طریق افزایش ظرفیت آنتی اکسیدان، کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، افزایش میزان فریتین دانه، کاهش جذب آهن و در نتیجه کاهش تنش اکسیداتیو در گیاه صورت پذیرفت (Hajnoruzi et al., 2011). در تحقیق مزبور میزان کلسیم درون سلولی نیز کاهش یافت. یکی از تئوری‌های مختلفی که برای توجیه این اثرات مثبت ارائه شده، نظریه ICR (Ion Cyclotron Resonance) می باشد، که بر اساس آن شکل مناسبی از یک میدان ممکن است بتواند با تشدید نوسان خود به‌خودی برخی یونها یا مولکول‌های زیستی (مثل کانال‌ها، پمپ‌ها و ترانسپورترها)، آنها را به تحرک بیشتر وادار ساخته و از این طریق سبب تحریک رشد گردد (Liboff et al., 1989). از جمله

مهم‌ترین این یونها، یون Ca^{2+} می‌باشد و تحقیقات اخیر نشان داده که ICR- Ca^{2+} یک مکانیسم بارز در درک میدان مغناطیسی در ترکیب با میدان الکترومغناطیسی می‌باشد (Pazur and Rassadina, 2009).

با توجه به این که تأثیر میدان‌های مغناطیسی در مدل‌های جانوری بیشتر مورد بررسی بوده (Robertson et al., 1996)، و در سامانه‌های گیاهی کمتر به آن توجه شده است، در این مطالعه تأثیر میدان‌های مغناطیسی ایستا (Static magnetic field; SMF) و میدان‌های الکترومغناطیسی (Electromagnetic field; EMF) بر رشد طولی، فعالیت سامانه آنتی اکسیدان، تمامیت غشا و میزان کلسیم و آهن کل در مرحله رویشی گیاه گندم مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها:

مواد گیاهی و تیمارها: بذره‌های گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم کویر از موسسه اصلاح نهال و بذر کرج خریداری شد. دانه‌های ظاهراً یک شکل و یک اندازه انتخاب شدند و ضدعفونی سطحی با شستشوی متوالی با شوینده معمولی هیپوکلریت سدیم (دارای ۵٪ کلر فعال)، اتانل ۷۵٪ و ۳ بار آبکشی با آب مقطر بر روی آنها انجام گرفت. سپس دانه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در آب مقطر خیسانده شده و بین دو لایه کاغذ صافی مرطوب در شرایط تاریکی جوانه زدند. دانه‌رست‌های ۵ روزه یک دست و همسان انتخاب و پس از ۵ روز سازگاری و رشد در محیط نیم هوگلند تحت تیمار با میدان الکترومغناطیسی (10 KHz) و میدان مغناطیسی ایستا (30 mT) به مدت ۴ روز، هر روز ۵ ساعت قرار گرفتند. فرکانس میدان الکترومغناطیسی در نزدیکی دکل برق‌های فشار قوی ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد (Robertson et al., 1996). شدت میدان مغناطیسی ایستا در تجهیزات مغناطیس تراپی 30 mT می‌باشد که حداقل شدتی است که می‌تواند سبب تحریک غشای سلول‌ها زنده گردد (Sakhnini and Dairi, 2004). توصیف دستگاه‌های مولد

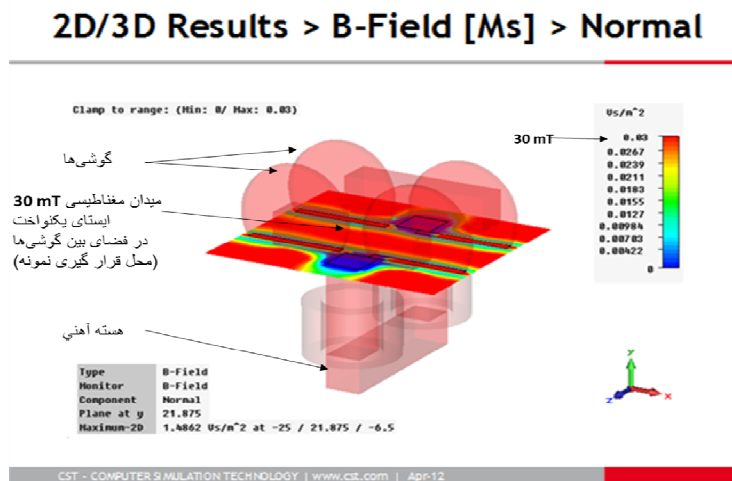


شکل ۱- دستگاه های تولید کننده میدان مغناطیسی، (A) EMF دارای سامانه کنترل فرکانس و نمایش فرکانس به صورت دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ هرتز، محل قرارگیری نمونه در داخل محفظه می باشد، (B) SMF جریان برق شهری پس از گذر از یکسو کننده (سمت چپ) وارد سیم پیچ های اطراف یک هسته آهنی شده به کمک چهار گوشی دایره شکل آهنی، میدان مغناطیسی ایستای یکنواختی را در فضای بین گوشی ها (محل قرار گیری نمونه) ایجاد می کند.

قرارگیری نمونه ها با یک تسلا متر (PHYWE, 13610.93, Gottingen, Germany) همچنین نرم افزار شبیه سازی CST (Computer Simulation Technology) بررسی شد (شکل ۲). رشد طولی ریشه و اندام هوایی (با کاغذ میلی-متری) و هدایت الکتریکی غشای سلول های ریشه با استفاده از گیاه تازه اندازه گیری شده و بقیه گیاهان برای انجام آنالیزهای بیوشیمیایی در نیتروژن مایع تثبیت و در فریزر ۸۰- سانتی گراد نگهداری شدند.

EMF و SMF در مطالعات قبلی آمده و تصویر آنها در شکل ۱ مشاهده می شود.

شدت میدان و طول دوره پرتو دهی نیز بر اساس نتایج مطالعات قبلی و منابع موجود انتخاب گردید (Sahebamei *et al.*, 2007; Abdollahi *et al.*, 2012). بذره های شاهد در همان شرایط و به اندازه کافی دو راز دستگاه های مولد میدان مغناطیسی و فقط تحت میدان مغناطیسی زمین قرار گرفتند. یکنواختی SMF در محل



شکل ۲ - آزمون یکنواختی میدان مغناطیسی ایستا با استفاده از نرم افزار شبیه سازی کامپیوتری CST. (A-B) یکنواختی SMF ایجاد شده در فضای قرارگیری نمونه‌ها از زوایای مختلف (نوار قرمز ۳۰ میلی تسلا در فضای بین گوشه‌ها ایجاد شده است).

قرار گرفت. پس از سرد شدن لوله‌ها در یخ، جذب آنها در طول موج‌های ۵۳۲ nm و ۶۰۰ nm با اسپکتروفتومتر (Cintra6, GBC, Australia) خوانده شد. میزان MDA با استفاده از ضریب ثابت $\epsilon = 155 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ محاسبه گردید (Sahebamei *et al.*, 2007).

استخراج و سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT): نمونه‌ها (۲/۰ گرم) در ۳ میلی لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی مولار با pH برابر ۶/۸ عصاره گیری و همگنای حاصل در $g \times 1200$ به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفوژ شد. از مایع شناور رویی برای سنجش فعالیت کاتالاز استفاده گردید. ۳ میلی لیتر مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی مولار با pH برابر ۶/۸، ۱۰ میلی مولار H_2O_2 و عصاره آنزیمی به مقدار مناسب بود. فعالیت آنزیمی با اندازه گیری تجزیه H_2O_2 و کاهش جذب در طول موج ۲۴۰ nm و به ازای هر میلی گرم پروتئین در عصاره آنزیمی محاسبه شد (Sahebamei *et al.*, 2007). میزان پروتئین با روش برادفورد با استفاده از آلبومین سرم گاوی (BSA) به عنوان استاندارد اندازه گیری شد (Bradford, 1976).

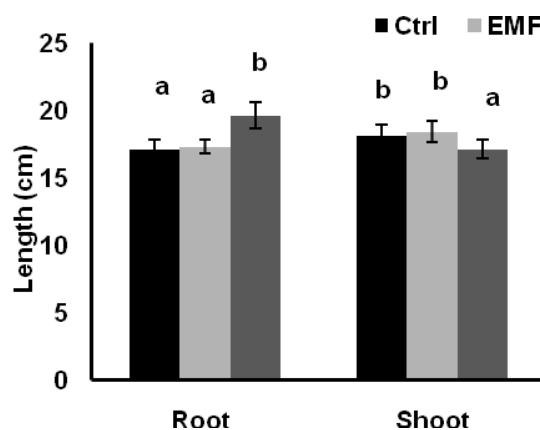
استخراج و سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (PO):

اندازه گیری هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity; EC)

صد میلی گرم از ریشه‌های تازه نمونه‌های کنترل و تیمار شده گندم در ابعاد یک سانتی متر بریده شده، در آب دیونیزه غوطه ور گردید. سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای آزمایشگاه بر روی شیکر چرخان قرار داده شده EC نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه با EC متر (Sartorius PT-20/C1, Germany) اندازه گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در حمام آب ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شده و پس از سرد شدن دوباره EC آنها قرائت شد. نشت الکتریکی غشای سلول‌ها از تقسیم EC اولیه به EC ثانویه به دست آمده و به صورت درصد گزارش شد (Payez *et al.*, 2012).

سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشا (LPO):

صد میلی گرم از نمونه در ۳ میلی لیتر محلول ۱۰٪ (حجم/وزن) تری کلرو استیک اسید (TCA) عصاره گیری شد. سپس نمونه‌ها در $g \times 1200$ به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفوژ شد. به ۱ میلی لیتر از بخش بر رو شناور حاصل، ۱ میلی لیتر تیوباربیتوریک اسید (TBA) ۰/۵٪ افزوده شده و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۱۰۰ درجه سانتی گراد



شکل ۳- تأثیر تیمار EMF و SMF بر رشد طولی ریشه و اندام هوایی گیاهان گندم. مقادیر، میانگین حداقل ۹ تکرار $\pm$ انحراف معیار می باشد. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین میانگین ها در سطح $P < 0.05$ است.

اندازه گیری محتوای آهن و کلسیم کل: اندازه گیری مقدار کل آهن و کلسیم نمونه ها پس از هضم اسیدی خاکستر آنها، به روش اسپکترومتری جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (AA-670G, SHIMADZO, Japan) انجام شد (Hajnoruzi *et al.*, 2011).

آنالیزهای آماری: کلیه آزمایش ها با سه بار تکرار مستقل و هر یک با حداقل سه نمونه تکرار شد. آنالیز داده ها با روش ANOVA در برنامه آماری SPSS نسخه 16.0 انجام گرفت. اختلاف معنی دار بین میانگین ها در سطح $P < 0.05$ بر اساس آزمون LSD تعیین گردید.

نتایج:

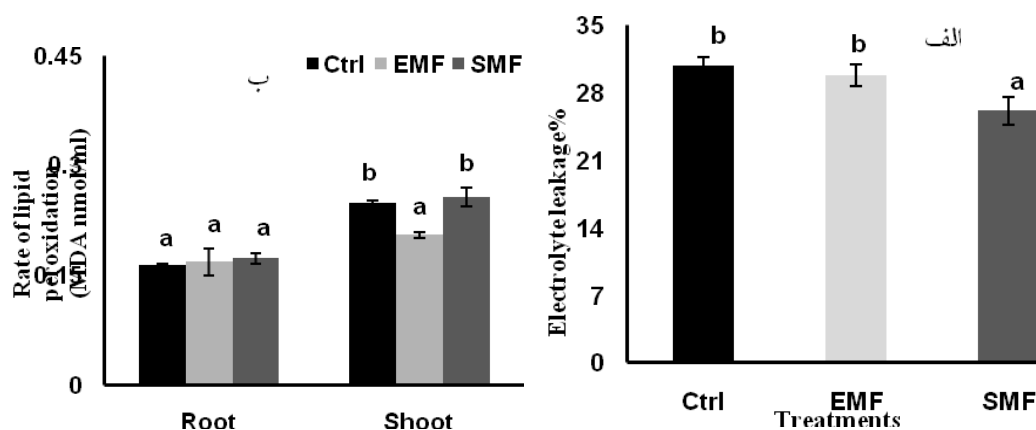
طول ریشه و اندام هوایی در گیاهان گندم تحت تیمار با EMF نسبت به گیاهان شاهد تفاوت معنی داری نداشت. در گیاهان تیمار شده با SMF، طول ریشه افزایش معنی دار و طول اندام هوایی کاهش معنی داری نسبت به گیاهان شاهد نشان داد (شکل ۳).

نشت الکترولیت ها از غشای سلول های ریشه تحت تأثیر تیمار EMF قرار نگرفت ولی تیمار SMF این میزان را به طور معنی داری کاهش داد (شکل ۴ الف).

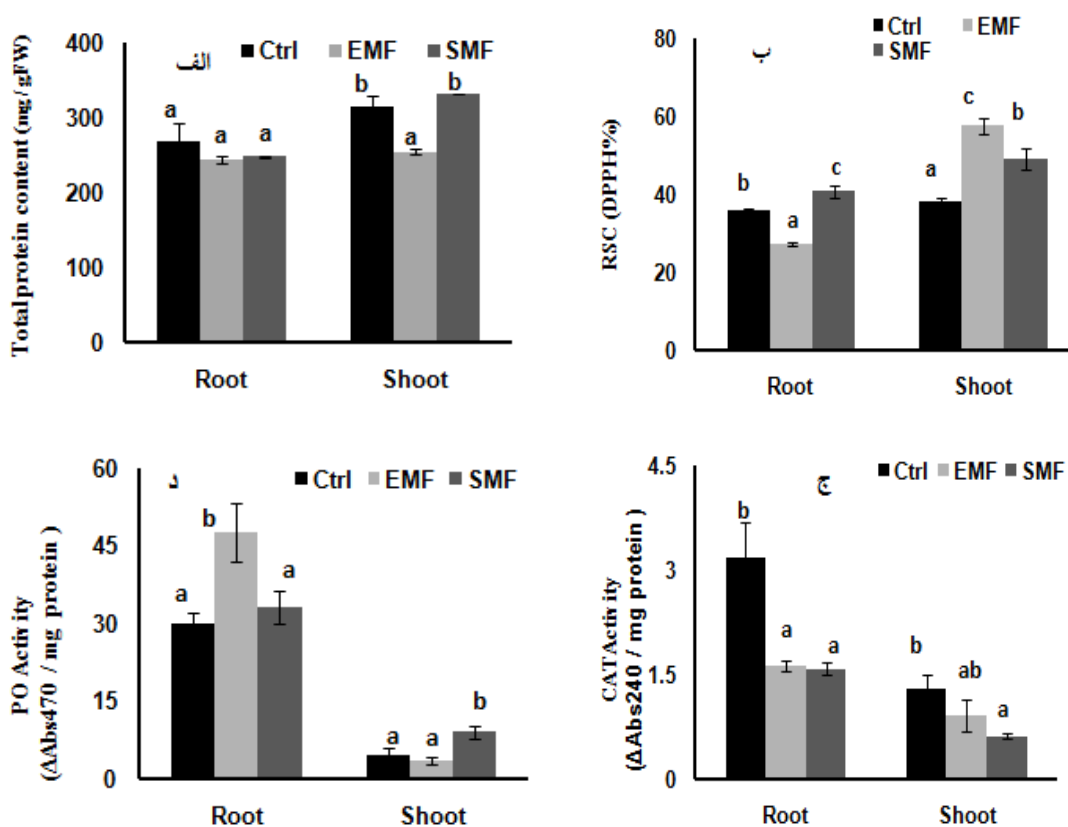
نمونه ها (۲/۰ گرم) در ۳ میلی لیتر بافر فسفات سدیم ۶۰ میلی مولار با pH برابر ۶/۱ عصاره گیری و همگنای حاصل در $g \times 15000$ به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفوژ شد. از بخش بر رو شناور برای اندازه گیری فعالیت پراکسیداز استفاده گردید. ۳ میلی لیتر ترکیب واکنش حاوی بافر فسفات سدیم ۶۰ میلی مولار با pH برابر ۶/۱، گایاکول ۲۸ میلی مولار، H_2O_2 ۵ میلی مولار و عصاره آنزیمی به مقدار مناسب بود. فعالیت آنزیمی به صورت افزایش جذب در طول موج ۴۷۰ nm در دقیقه به ازای هر میلی گرم پروتئین نمونه محاسبه گردید (Abdolmaleki *et al.*, 2007).

سنجش ظرفیت جاروب کنندگی رادیکال های آزاد

(RSC): ابتدا ۲/۰ گرم از نمونه در ۳ میلی لیتر متانول مطلق عصاره گیری شده و در $g \times 5000$ به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفوژ شد. بخش رو شناور به نسبت ۱/۱۰ با متانول رقیق شده، سپس رادیکال پایدار DPPH (۱ و ۱- دی فنیل-۲- پیکریل هیدرازیل) با غلظت ۰/۰۰۸٪ به آن اضافه گردید. نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفته و پس از آن جذب در طول موج ۵۱۷ nm با اسپکتروفوتومتر خوانده شد. کلیه مراحل در ۴ درجه سانتی گراد انجام گرفت (N'Guessan *et al.*, 2007).



شکل ۴- الف) تأثیر تیمار EMF و SMF بر نشت الکتریکی غشای سلول های ریشه گندم. ب) تأثیر تیمار EMF و SMF بر پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی ریشه و اندام هوایی گیاهان گندم. مقادیر، میانگین حداقل سه تکرار $\pm$ انحراف معیار می باشد. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین میانگین ها در سطح $P < 0.05$ است.



شکل ۵- الف) میزان پروتئین کل، ب) ظرفیت جاروبگری کل رادیکال های آزاد، ج) میزان فعالیت آنزیم CAT و د) میزان فعالیت آنزیم PO در ریشه و اندام هوایی گیاهان گندم. مقادیر، میانگین حداقل سه تکرار $\pm$ انحراف معیار می باشد. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین میانگین ها در سطح $P < 0.05$ است.

جدول ۱- تأثیر تیمارهای EMF و SMF بر میزان کلسیم و آهن کل گیاه گندم

کلسیم		آهن		غلظت ($\mu\text{g} / \text{g FW}$)
اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه	اندام
۴۹/۲۳±۰/۵۷ ^b	۱۹/۲۶±۰/۸۶ ^c	۱/۲۱±۰/۰۰ ^a	۳/۲۹±۰/۲۷ ^b	شاهد
۳۲/۴۴± ۲/۴۶ ^a	۱۵/۶۰±۱/۳۷ ^b	۱/۳۶±۰/۰۳ ^b	۲/۲۳±۰/۱۴ ^a	تیمار یافته با EMF
۶۳/۶۲±۲/۳۱ ^c	۱۰/۴۴±۰/۶۷ ^a	۱/۵۳±۰/۰۴ ^c	۲/۴۸±۰/۱۶ ^a	تیمار یافته با SMF

مقادیر، میانگین حداقل سه تکرار ± انحراف معیار می باشد. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین میانگین ها در سطح $P < 0.05$ است.

بحث:

میدان های الکتریکی، مغناطیسی (MF) و الکترومغناطیسی (EMF) از جمله تنش های غیر زیستی هستند که حاصل عصر تکنولوژی بوده و امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده اند. در حال حاضر درک مغناطیس در سلول های گیاهی با سه مکانیسم جفت رادیکال (radical-pair mechanism)، فری مگنتیسم (ferrimagnetism) و یون سیکلوترون رزونانس (cyclotron resonance mechanism ion) توضیح داده می شود (Galland and Pazur, 2005). در این تحقیق پاسخ های متعدد گیاه گندم به میدان های مغناطیسی می تواند با مکانیسم "ion cyclotron resonance" توضیح داده شود. این مدل می تواند چگونگی تأثیر میدان مغناطیسی را بر ساختار غشای پلاسمایی، تغییر نفوذپذیری آن و انتقال یون ها توضیح داده و تأثیرها بعدی آن را بر فعالیت مسیرهای متابولیکی روشن نماید. اثرات مهاری یا تحریکی میدان مغناطیسی بر رشد بافت ها به عوامل گوناگونی نظیر گونه و اندام گیاهی، فرکانس و نوع میدان، شکل موج میدان، مدت زمان تیمار و سایر عوامل تنش زا بستگی دارد (Kato et al., 1989; Liboff et al., 1989). در تحقیق حاضر رشد طولی ریشه در تیمار با SMF افزایش و در اندام هوایی کاهش معنی داری یافت. افزایش سرعت رشد گیاه و توسعه ریشه در تیمار با میدان مغناطیسی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (Hajnoruzi et al., 2011).

پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی نیز به جز در اندام هوایی که تحت تیمار EMF کاهش یافت، در بقیه موارد تحت تأثیر MF قرار نگرفت (شکل ۴ ب). شکل ۵ تأثیر تیمار میدان مغناطیسی را بر برخی پارامترهای بیوشیمیایی در گیاه گندم نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود میزان پروتئین کل به جز در اندام هوایی که تحت تأثیر تیمار EMF کاهش یافته، در بقیه موارد نسبت به گیاهان شاهد تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار نگرفت (شکل ۵ الف). ظرفیت جاروبگری کل رادیکال های آزاد (RSC) در اثر تیمار SMF در ریشه و اندام هوایی نسبت به گیاهان شاهد افزایش معنی دار یافت، ولی در اثر تیمار EMF در ریشه کاهش معنی دار و در اندام هوایی افزایش معنی دار یافت (شکل ۵ ب). میزان فعالیت آنزیم CAT در ریشه و اندام هوایی نسبت به گیاهان شاهد تحت تیمار میدان مغناطیسی کاهش معنی دار یافت، به جز در اندام هوایی که نسبت به تیمار EMF تحت تأثیر قرار نگرفت (شکل ۵ ج). میزان فعالیت آنزیم PO در ریشه تحت تیمار EMF و در اندام هوایی تحت تیمار SMF افزایش معنی دار یافته و در بقیه موارد تحت تأثیر قرار نگرفت (شکل ۵ د). میزان کلسیم کل نسبت به گیاهان شاهد به جز در اندام هوایی گیاهانی که تحت تیمار SMF افزایش معنی دار یافته در بقیه موارد کاهش معنی دار یافت (جدول ۱). میزان آهن کل در ریشه تحت تیمار میدان مغناطیسی کاهش معنی دار و در اندام هوایی افزایش معنی دار یافت (جدول ۱).

که می‌تواند به دلیل افزایش جذب آب و مواد غذایی در ریشه باشد (Garcia and Arza, 2001). از طرفی Kordas (۲۰۰۲) نشان داد که میدان مغناطیسی باعث کاهش طول ساقه گندم شد. این امر ممکن است به دلیل افزایش دمای درونی گیاه بیش از حد بحرانی و به دنبال آن مختل شدن فرآیند رشد باشد (Vaezzadeh *et al.*, 2006).

گزارش‌های متعدد حاکی از این است که تیمار کوتاه مدت میدان می‌تواند سبب تنش اکسیداتیو شده ساختار غشا، رشد سلولی و حتی مرگ سلولی را تحت تأثیر قرار دهد (Zhang *et al.*, 2003). بیش از ۵۰ آنزیم (شامل آنزیم‌های آهن‌دار نظیر SOD، CAT، PO) شناخته شده‌اند که در طی کاتالیز تولید رادیکال آزاد می‌نمایند و لذا می‌توانند تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند (Atak *et al.*, 2007). پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، یکی از گونه‌های سمی و فعال اکسیژن است و از طریق واکنش Fenton and Haber-Weiss که با آهن کاتالیز می‌شود منجر به تولید رادیکال‌های بسیار خطرناک هیدروکسیل می‌گردد. رادیکال‌های هیدروکسیل واکنش‌های زنجیره‌ای را شروع کرده و منجر به پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی می‌گردند (Bowler *et al.*, 1992). سمیت زدایی و جاروب کردن H_2O_2 می‌تواند توسط آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی و آنزیمی مانند CAT و PO صورت گیرد. اگر چه تمام آنزیم‌های جاروبگر H_2O_2 به صورت هماهنگ در مسیری عمل می‌کنند که منجر به بقای سلول در شرایط طبیعی گردد، ولی به احتمال زیاد در بین آنزیم‌های جاروبگر CAT، ROS آنزیم کلیدی است که به طور موثری H_2O_2 را حذف کرده و لذا فعالیت آنزیم PO را تنظیم می‌کند (Sahebamei *et al.*, 2007). تحقیقات مختلف نشان داده که میزان آسیب اکسیداتیو در گیاهانی که در معرض تنش‌های غیر زیستی قرار می‌گیرند، توسط ظرفیت سامانه آنتی‌اکسیدان یا ظرفیت جاروب کنندگی رادیکال‌های آزاد (RSC) آنها کنترل می‌شود (Sreenivasulu *et al.*, 2000). در تحقیق حاضر RSC گیاهان گندم به جز در ریشه که تحت تیمار با EMF کاهش یافت،

در بقیه موارد نسبت به گیاهان شاهد افزایش معنی‌دار یافت ولی فعالیت آنزیم CAT در تیمار با میدان‌ها نسبت به گروه شاهد کاهش یافت. لذا با توجه به تجمع پراکسید هیدروژن لازم است تا آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی دیگری آنها را جاروب کنند. آنزیم PO یکی از آنهاست که فعالیت آن در اثر تیمار EMF در ریشه و در اثر تیمار SMF در اندام هوایی افزایش یافت تا با همکاری سایر آنتی‌اکسیدان‌ها مانع پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی شده و باعث حفظ تمامیت غشا گردد. افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدان‌ها یا RSC هر چند ممکن است باعث حفاظت گیاهان تحت شرایط ویژه‌ای شود، ولی ممکن است با آبشار علامت‌رسانی درگیر در سازگاری گیاهان برهم‌کنش داشته باشد (Dat *et al.*, 2001).

همان‌طور که در این تحقیق نیز مشاهده می‌شود سطح MDA که بیانگر میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی است، در اثر تیمار با میدان مغناطیسی نسبت به گروه شاهد افزایش نیافته بلکه در اندام هوایی در اثر تیمار با EMF کاهش نیز یافته است. این پدیده در برخی تحقیقات گذشته نیز مشاهده شده است (Hajnorouzi *et al.*, 2011).

پیشنهاد شده است که میدان مغناطیسی می‌تواند ساختار غشاهای سلولی را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش نفوذپذیری آنها شود و از این طریق موجبات تغییر فعالیت مسیرهای متابولیکی را فراهم سازد (Labels, 1993). بر خلاف این نظر، در مطالعه حاضر نشأت الکترولیت‌ها از غشای ریشه گیاهان تیمار شده با SMF کاهش یافت. کاهش نشأت الکترولیت‌ها از خلال غشای سلول‌های ریشه گندم به همراه عدم افزایش پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی نسبت به نمونه‌های شاهد در تیمار با SMF به دلیل افزایش تمامیت غشا و بهبود ویژگی‌های آن می‌باشد که منجر به رشد بهتر این اندام می‌گردد. مشابه این نتیجه در تحقیق قبلی در دانه رست‌های گندم در اثر تیمار EMF و SMF مشاهده شد (Payez *et al.*, 2012).

همچون کاهش میزان آن در ریشه و افزایش آن در اندام هوایی گیاهان تحت تیمار با SMF نسبت به گیاهان شاهد این احتمال را تقویت می‌کند که آهن جذب شده بلافاصله به اندام هوایی منتقل شده باشد. کاهش میزان آهن کل در ریشه گندم نسبت به گیاهان شاهد در اثر تیمار با میدان مغناطیسی مطابق با سایر مطالعات می‌باشد (Hajnorouzi et al., 2011). همان طور که در مطالعات قبلی نیز مشاهده می‌شود کاهش کلسیم و آهن کل در ریشه با رشد بیشتر آن و افزایش آهن کل در اندام هوایی با رشد کمتر آن هم‌خوانی دارد (Hajnorouzi et al., 2011; Nechiporenko et al., 2001).

تیمار گیاه گندم در مرحله رویشی با میدان مغناطیسی ایستا و متناوب در کل سبب افزایش ظرفیت جاربوگری رادیکال‌های آزاد و فعالیت آنزیم پراکسیداز، کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز، حفظ تمامیت غشا، کاهش کلسیم و آهن کل در ریشه و افزایش آهن کل در اندام هوایی در گیاه گندم شد. اما در این میان تفاوت‌هایی بین تغییرات مشاهده شده در اثر تیمار با SMF و EMF و همچنین در ریشه و اندام هوایی گندم وجود داشت و در این رابطه، تأثیر SMF بیشتر و چشمگیرتر بود. بر مبنای نتایج تحقیق حاضر شاید تیمار با میدان‌های مغناطیسی را بتوان در مقایسه با روش‌های رایج، به عنوان روشی با هزینه کمتر و خطر آلودگی‌های زیست محیطی کمتر برای بهبود رشد گندم در مرحله رشد رویشی پیشنهاد نمود.

تشکر و قدر دانی:

نویسندگان مقاله از حمایت قطب تنش‌های گیاهی، دانشگاه اصفهان تشکر می‌نمایند.

در تحقیقات Nechiporenko و همکاران (۲۰۰۱) نشان داده شده است که بالانس ترکیبات معدنی در دانه‌رست‌های تربچه و پیاز تحت میدان‌های ضعیف مغناطیسی به هم می‌خورد. در تحقیق حاضر میزان کلسیم کل در اندام هوایی گیاهان تحت تیمار با SMF نسبت به گیاهان شاهد افزایش معنی‌دار و در بقیه موارد کاهش معنی‌دار یافت. غلظت زیاد کلسیم می‌تواند سیگنال مرگ را به سلول القا کند و لذا کاهش کلسیم می‌تواند در جهت بهبود رشد و بقای سلول عمل کند. القای کاهش غلظت کلسیم در بافت‌های ریشه تحت تیمار هر دو میدان و پس از آن در اندام هوایی تحت تیمار SMF مطابق با نتایج Hajnorouzi و همکاران (۲۰۱۱) بود. آنها چنین بیان داشتند که کاهش سطح کلسیم احتمالاً به خاطر تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی بر نفوذپذیری غشا یا حاصل تأثیر مستقیم آن بر کانال‌های کلسمی و پمپ‌ها و در نتیجه خروج کلسیم از سیتوسل به محیط خارج سلولی توسط آنتی پورترهای $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$ و Ca^{2+} -ATPase می‌باشد. به نظر می‌رسد که فرضیه ICR توجیه مناسبی برای تغییر غلظت کلسیم درون سلولی داشته باشد. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، اعمال میدان باعث افزایش نوسان یون‌ها در دو طرف غشا و همچنین یون‌های متصل به پروتئین‌ها از جمله کانال‌های غشایی شده و از طریق تنظیم فعالیت آنها تعادل یونی سلول را تغییر می‌دهد. میزان آهن کل در مطالعه حاضر در ریشه تحت تیمار میدان مغناطیسی کاهش معنی‌دار و در اندام هوایی افزایش معنی‌دار یافت. هم‌مستازی آهن در گیاهان از طریق مکانیسم‌های مختلفی کنترل می‌شود. گرچه استفاده از آهن نشان‌دار و ردگیری نقطه به نقطه آن در طول گیاه میسر نبود اما شواهدی

منابع:

- phytoplasma. The Scientific World Journal 2012; 1-6.
Abdollahi, F., Ghanati, F., Sahebamei, H. and Sabet Sarvestani, A. (2007) Peroxidase activity, lignifications and promotion of cell death in to-

- Abdollahi, F., Niknam, V., Ghanati, F., Masroor, F. and Nasr Noorbakhsh, S. (2012) Biological effect of weak electromagnetic field on healthy and infected lime (*Citrus aurantifolia*) trees with

- netic field on the content of main cations in onion organs and in radish plants of basic magnetically-oriented types. In: Plant under environmental stress. Pp. 205-206. Publishing House of Peoples Friendship University of Russia, Moscow.
- N'Guessan, J. D., Bidie, A. P., Lenta, B. N., Weniger, B., Andre, P. and Guede-Guina, F. (2007) In vitro assays for bioactivity-guided isolation of antisalmonella and antioxidant compounds in *Thonningia sanguinea* flowers. African Journal of Biotechnology 6:1685-1689.
- Pandolfini, T., Gabbrielli, R. and Comparini, C. (1992) Nickel toxicity and peroxidase activity in seedlings of *Triticum aestivum* L. Plant Cell and Environment 15:719-725.
- Payez, A., Ghanati, F., Behmanesh, M., Abdolmaleki, P., Hajnorouzi, A. and Rajabbeigi E. (2012) Increase of seed germination, growth and membrane integrity of wheat seedlings by exposure to static and electromagnetic fields. Electromagnetic Biology and Medicine (In Press).
- Pazur, A. and Rassadina, V. (2009) Transient effect of weak electromagnetic fields on calcium ion concentration in *Arabidopsis thaliana*. BMC Plant Biology 9:47.
- Robertson, I. G. C., Wilson, W., Dawson, B. V., Zwi, L. J., Green, A. W., Boys, J. T. (1996) Evaluation of potential health effects of 10 kHz magnetic fields: A short-term mouse toxicology study. Bioelectromagnetics 17:111-122.
- Sahebjamei, H., Abdolmaleki, P. and Ghanati, F. (2007) Effects of static magnetic field on the antioxidant enzymes activities of suspension-cultured tobacco cells. Bioelectromagnetics 28:42-47.
- Sakhnini, L. and Dai, M. (2004) Effects of Static Magnetic Fields on Early Embryonic Development of the Sea Urchin *Echinometra mathaei*. IEEE Transactions on Magnetics 40: 2979-2981.
- Sreenivasulu, N., Grimm, B., Wobus, U. and Weschke W. (2000) Differential response of antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive seedling of foxtail millet (*Setaria italica*). Physiologia Plantarum 109: 435-442.
- Vaezzadeh, M., Noruzifar, E., Ghanati, F., Salehkotahi, M. and Mehdian, R. (2006) Excitation of plant growth in dominant temperature by steady magnetic field. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 302: 105-108.
- Zhang, Q. M., Tokiwa, M., Doi, T., Nakahara, T., Chang, P. W., Nakamura, N., Hori, M., Miyakoshi, J. and Onei, S. (2003) Strong static magnetic field and the induction of mutations through elevated production of reactive oxygen species in *Escherichia coli* soxR. International Journal of Radiation Biology 79:281-286.
- bacco cells exposed to static magnetic field. Environmentalist 27:435-440.
- Aladjadjian, A. (2007) The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria. Journal of Central European Agriculture 8:369-380.
- Atak, C., Celik, O., Olgun, A., Alikamanoglu, S. and Rzakoulieva, A. (2007) Effect of magnetic field on peroxidase activities of soybean tissue culture. Biotechnology and Biotechnological Equipment 21:166-171.
- Bowler, C., Montagu, M. V. and Inze, D. (1992) Superoxide dismutase and stress tolerance. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 43:83-116.
- Bradford, M. (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry 72: 248-254.
- Dat, J. F., Van Montagu, M., Inze, D. and Van Breusegem, F. (2001) Catalase-deficient tobacco plants: tools for in planta studies on the role of hydrogen peroxide. Redox Report 6:37-42.
- Galland, P. and Pazur, A. (2005) Magnetoreception in plants. Journal of Plant Research 118:371-389.
- Garcia, R. F., and Arza, P. L. (2001) Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part I: theoretical considerations. Bioelectromagnetics 22:589-595.
- Ghanati, F., Abdolmaleki, P., Vaezzadeh, M., Rajabbeigi E. and Yazdani, M. (2007) Application of magnetic field and iron in order to change medicinal products of *Ocimum basilicum*. Environmentalist 27:429-434.
- Hajnorouzi, A., Vaezzadeh, M., Ghanati, F., Jamnezhad, H. and Nahidian, B. (2011) Growth promotion and a decrease of oxidative stress in maize seedlings by a combination of geomagnetic and weak electromagnetic fields. Journal of Plant Physiology 168:1123-1128.
- Kato, R., Kamada, H. and Asashima, M. (1989) Effect of high and very low magnetic field on the growth of hairy roots of *Daucus carotta* and *Atropa belladonna*. Cell Physiology 30: 605-608.
- Kavi, P. S. (1977) The effect of magnetic treatment of soybean seed on its moisture absorbing capacity. Science Culture 43:405-406.
- Kordas, L. (2002) The effect of magnetic field on growth, development and the yield of spring wheat. Polish Journal of Environmental Studies 11:527-530.
- Labels, M. M. (1993) A possible explanation for the effect of magnetic fields on biological systems. Nature 211:969-975.
- Liboff, A. R., McLeod, B. R. and Smith, S. D. (1989) Rotating magnetic fields and iron cyclotron resonance. Journal of Bioelectronics 8:119-125.
- Nechiporenko, G. A., Dobrovolski, M. V., Novitsky, I. Y. (2001) The effect of weak permanent mag-