

برهم‌کنش میدان الکترومغناطیسی (با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز) با نانوذرات فریتین و سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه گندم در مرحله زایشی

عاطفه پایز^۱، فائزه قناتی^{۱*}، پرویز عبدالمالکی^۲ و مهرداد بهمنش^۳

^۱ گروه علوم گیاهی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ گروه بیوفیزیک، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ گروه ژنتیک، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر، تأثیر میدان الکترومغناطیسی (۱۰ کیلوهرتز) بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) بررسی شد. بدین منظور گیاهان در مرحله زایشی به مدت ۴ روز متوالی، روزانه ۵ ساعت تحت تیمار میدان قرار گرفتند. پس از آن میزان آهن، نسبت پروتئین‌های آهن‌دار به کل پروتئین‌ها، مقدار، اندازه و ساختمان دوم نانوذرات فریتین در تمام نمونه‌ها و فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی در بذرها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با نمونه‌های شاهد، تیمار میدان الکترومغناطیسی باعث افزایش میزان آهن در تمام اندام‌ها به غیر از دانه و افزایش نسبت پروتئین‌های آهن‌دار به کل پروتئین‌ها در دانه گردید. محتوای نانوذرات فریتین و همچنین ساختمان دوم آنها تحت تأثیر میدان مغناطیسی در بذر و کاه گندم کاهش یافت، در حالی که اندازه این ذرات نسبت به نمونه‌های شاهد به طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین این تیمار با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و کاهش فعالیت آنزیم پراکسیداز دانه‌های گندم، موجب حفظ تمامیت غشا گردید. این نتایج بیانگر این است که تأثیر میدان الکترومغناطیسی با فرکانس به کار رفته بر گیاه گندم به واسطه تغییر معنی‌دار میزان آهن، پروتئین‌های آهن‌دار و به ویژه فریتین و خواص آن و تغییر در سیستم آنتی‌اکسیدانی انجام می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: آهن، گندم، میدان الکترومغناطیسی، نانوذرات فریتین

مقدمه

حمل و نقل عمومی و نیز در عرصه‌های پزشکی در زندگی روزمره انسان رو به گسترش است. با وجود این، در مورد تأثیر مثبت یا منفی این میدان‌ها بر موجودات زنده اتفاق نظر کاملی وجود ندارد. اگرچه پژوهش‌های

استفاده از میدان‌های الکترومغناطیسی (EMF, Electromagnetic fields) به سبب کاربرد وسیع لوازم خانگی توسعه مخابرات، خطوط انتقال نیرو، سیستم

واسطه مولکول زیستی دیگری نظیر فریتین انجام شود. به بیان دیگر، این احتمال وجود دارد که EMF از طریق تشدید نوسان یک مولکول فری‌مگنتیک نظیر فریتین بر فعالیت کانال تأثیر بگذارد. فریتین، پروتئین ذخیره‌کننده آهن است که پوشش آن به نام آپوفریتین از ۲۴ زیر واحد تشکیل شده است. وزن مولکولی این پروتئین کروی در گیاهان ۵۴۰ کیلو دالتون و اندازه آن ۱۲-۱۳ نانومتر است که در مرکز آن نانو ذره فری‌هیدرات (FeOOH) به اندازه ۸ نانومتر که از حدود ۴۵۰۰ یون آهن Fe^{3+} تشکیل شده، قرار دارد (Theil and Briat, 2004). فریتین در بذرها، به احتمال قوی شکل اصلی ذخیره آهن به منظور تأمین و آزاد کردن آهن برای پروتئین‌های آهن‌دار برای مرحله پس از جوانه‌زنی است. در برگ‌ها نیز فرض بر این است که فریتین در مراحل اولیه نمو به عنوان منبع ذخیره برای سنتز پروتئین‌های آهن‌دار دخیل در فتوسنتز مصرف می‌شود (Briat et al., 1999).

نقش دیگر فریتین در جلوگیری از ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS, Reactive Oxygen Species) ناشی از به راه افتادن واکنش فنتون (Fenton)، از طریق ذخیره آهن به شکل Fe^{3+} است. علت دیگر برای آثار متعدد میدان مغناطیسی روی موجودات زنده، تنش اکسیداتیو ناشی از افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن است که با میانجیگری آهن انجام می‌گیرد. تنش اکسیداتیو می‌تواند ساختار غشا، رشد سلولی و حتی مرگ سلولی را تحت تأثیر قرار دهد (Green et al., 1999). امروزه فریتین عاملی مهم در آسیب‌شناسی بیماری‌هایی نظیر: تنگی رگ‌ها، سرطان و بیماری‌های عصبی-روانی به شمار می‌رود. مکانیسم‌های متعددی نظیر مسیرهای اکسیداتیو و التهابی به عنوان مسؤول این

متعددی در زمینه تأثیر این میدان‌ها بر سلول‌های جانوری و انسانی انجام شده است (Aladjadjiyan, 2002؛ Belyavskaya, 2004)، اما مطالعات مشابه در مورد گیاهان بسیار اندک بوده است (Sobczak and Hajnorouzi et al., 2011؛ Law Kula, 2002؛ Payez et al., 2013). در حال حاضر، سه نوع مکانیسم اصلی برای درک میدان مغناطیسی در موجودات زنده پیشنهاد شده است: مکانیسم جفت رادیکال، فری‌مگنتیسم و یون سیکلوترون رزونانس. مکانیسم جفت رادیکال، شامل تغییر تبدیل نسبت یکتایی (singlet) و سه تایی (triplet) یک جفت رادیکال تحت تأثیر میدان مغناطیسی ضعیف است (Galland and Pazur, 2005). تأثیر میدان مغناطیسی بر واکنش‌های آنزیمی به کمک مکانیسم‌های جفت رادیکالی تفسیر شده است (Scaiano et al., 1994). مکانیسم دوم، یعنی فری‌مگنتیسم بیشتر در حد تئوری بوده، بر سلول‌های زنده آزمایش نشده است. در این مکانیسم، سیگنال میدان مغناطیسی به یک وکتور مغناطیسی (مگنتیت Fe_3O_4 یا مگهمیت γFe_3O_4) که معمولاً به طور طبیعی در سلول وجود دارد، منتقل می‌شود و اگر اندازه و شکل ذره مناسب باشد باعث رزونانس آن در فرکانس خاص می‌شود. بسته به مکان قرارگیری این ذره در داخل سلول، رزونانس آن ممکن است عملکرد معمول سلول را برهم زند (Guertin et al., 2007). بر اساس مکانیسم یون سیکلوترون رزونانس شکل مناسبی از یک میدان مغناطیسی ممکن است بتواند با تشدید نوسان خود به خودی برخی یون‌ها یا مولکول‌های زیستی (مانند کانال‌ها، پمپ‌ها و ترانسپورترها) آنها را به حرکت بیشتر وادارد (Liboff et al., 1989). تحریک کانال همچنین ممکن است به

(Robertson *et al.*, 1996) ولی مقالات مشابه در مدل‌های گیاهی کمیاب است. بنابراین، در پژوهش حاضر تأثیر این میدان بر میزان آهن و پروتئین‌های آهن دار، به ویژه فریتین و خواص آن و فعال شدن سیستم آنتی اکسیدانی در گیاه زراعی گندم در مرحله زایشی بررسی شد. بررسی در این زمینه می‌تواند شواهد تجربی برای مکانیسم‌های پیشنهاد شده برای پاسخ موجودات زنده به میدان‌های مغناطیسی به ویژه مکانیسم فری‌مگنتیسم که در حد تئوری است، فراهم کند.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و تیمار میدان الکترومغناطیسی:

بذرهای گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم کویر از مؤسسه اصلاح نهال و بذر کرج خریداری شد. سپس، حدود ۱۰۰ بذر یکنواخت در گلدان کاشته شد. نتایج آنالیز کامل فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها که توسط آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب و خاک انجام شد، در جدول ۱ آمده است. بر اساس نتایج آنالیز خاک، میزان مواد غذایی خاک برای رشد گندم مناسب است و هیچ گونه تنش غذایی (به ویژه کمبود یا زیادی آهن) را به گیاهان وارد نمی‌کند.

گیاهان حدود سه ماه در شرایط مزرعه رشد کرده، هر سه روز یک بار با آب معمولی و هر هفته یک بار با محلول غذایی ۱/۲ هوگلدن آبیاری شدند. این گیاهان در مرحله زایشی و رسیدن دانه‌ها تحت تیمار به مدت ۴ روز، هر روز ۵ ساعت قرار گرفتند. گیاهان شاهد در همان شرایط و به اندازه کافی دور از دستگاه‌های مولد میدان مغناطیسی و فقط تحت میدان مغناطیسی زمین قرار گرفتند. شدت میدان و طول دوره پرتودهی بر اساس نتایج مطالعات قبلی و منابع موجود انتخاب

بیماری‌ها شناخته شده است که با تغییر در ساختار و غلظت فریتین همراه است (Goswami *et al.*, 2009). شواهد تجربی زیادی مبنی بر نقش محافظتی فریتین در تنش‌های اکسیداتیو وجود دارد. برای نمونه، در لاین‌های سلولی سرطانی، حساسیت به اکسیدان‌ها نسبت معکوسی با سطح پروتئین فریتین دارد. افزایش سطح پروتئین فریتین، ذخیره کوچک مولکول آهن را در سلول افزایش داد و در مقابل، کاهش میزان فریتین حساسیت سلول‌ها با اکسیدان‌ها را افزایش داد. همچنین، بیش بیان پروتئین فریتین، سبب کاهش انواع گونه‌های اکسیدان در سلول‌ها گردید (Picard *et al.*, 1998).

تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در سلول‌های گیاهی مطالعه شده و نشان داده است که نظیر جانوران و انسان (Lacy-Hulbert *et al.*, 1998) در سلول‌های گیاهی نیز میدان مغناطیسی می‌تواند بر سیستم آنتی اکسیدانی و افزایش رادیکال‌های آزاد در سلول تأثیر بگذارد (Abdolmaleki *et al.*, 2007؛ Ghanati *et al.*, 2007). در گیاه باقلا (*Vicia faba* L.) نشان داده شده است که میدان مغناطیسی ایستا می‌تواند سبب ایجاد اختلال در سیستم دفاعی آنتی اکسیدان شود. در این گیاهان، تیمار با میدان مغناطیسی با کاهش محتوای فلاونوئید و کاهش فعالیت آنزیم‌های جاروب کننده گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد سبب تغییر عملکردهای حیاتی سلول‌ها گردید (Abdolmaleki *et al.*, 2007).

خطوط انتقال برق فشار قوی که به طور معمول در صنعت الکتریسیته استفاده می‌شود، میدان الکترومغناطیسی ۱۰ کیلوهرتز ایجاد می‌کند (Robertson *et al.*, 1996). تأثیر کلی ۱۰ کیلوهرتز EMF بر مدل‌های جانوری گزارش شده است

گردید (Payez et al., 2013). در پایان دوره تیماردهی گیاهان برداشت شد و برای انجام آنالیزهای بیوشیمیایی در نیتروژن مایع تثبیت و در فریزر ۸۰- درجه سانتیگراد نگهداری شدند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ریز مغذی‌های کم مصرف (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		ریز مغذی‌های پر مصرف		ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی	
۷	آهن	۵/۵	درصد محتوای کربن آلی	لومی و رسی	بافت
۱/۲	روی	۰/۳۲	نیتروژن کل درصد	۲۸	درصد رس
۰/۸۴	مس	۳/۲	سدیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۲۹	درصد سیلت
۶/۸	منگنز	۴/۰۲	کلسیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۴۳	درصد ماسه
۱/۲	بورون	۳۵۰	پتاسیم قابل دسترس (پی پی ام)	۳۴	درصد جذب آب
		۱۵	فسفر قابل دسترس (پی پی ام)	۱/۴۷	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)
		۳	منیزیم (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۷	اسیدیته
				۸/۵	درصد خنثی‌کنندگی
				۱/۷۱	نسبت جذب سدیم

دیجیتالی به همراه سیستم روشنایی در داخل محفظه تابش‌گیری تعبیه گردید. برای کالیبره کردن دستگاه در فرکانس مورد نظر با همکاری واحد پرتوهای غیر یون‌ساز وابسته به بخش حفاظت در برابر اشعه سازمان انرژی اتمی ایران، شدت میدان مغناطیسی بر حسب متر/آمپر اندازه‌گیری شد که نتایج جهت محاسبه انرژی جذب شده در گیاه استفاده گردید.



شکل ۱- دستگاه تولیدکننده میدان الکترومغناطیسی با سیستم تنظیم فرکانس و نمایش فرکانس به صورت دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ هرتز. محل قرارگیری نمونه در درون محفظه است.

دستگاه مولد میدان الکترومغناطیسی: دستگاه مولد امواج الکترومغناطیسی که برای این پژوهش طراحی و ساخته شد، دارای یک محفظه داخلی به ابعاد (۴۰×۵۰×۶۰ سانتی‌متر، به ترتیب: ارتفاع، عرض و طول) بود که به سادگی امکان قرارگیری چند گلدان را فراهم می‌کرد (شکل ۱).

سیستم از منبع تغذیه مجزای AC جهت تولید امواج الکترومغناطیسی و تهویه مرکزی استفاده می‌کند. این سیستم قابلیت تنظیم پیوسته فرکانس در دامنه فرکانس ۰/۱ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز را دارد. برای تولید امواج الکترومغناطیسی از یک سیم‌پیچ به ابعاد ۴۸×۳۴ سانتی‌متر که دارای ۲۸ دور سیم با سطح مقطع ۰/۳ میلی‌متر بود، استفاده شد. مقاومت ظاهری سیم‌پیچ معادل ۸ اهم بود و حداکثر توان مصرفی دستگاه ۹ وات بود که توسط یک سیستم کنترل توان از نوع آنالوگ امکان انتخاب توان‌های تابشی مختلف را فراهم می‌ساخت. برای تنظیم دما و نور یک حسگر گرمایی

(۲۰۱۲) استفاده شد. مقدار پروتئین کل و پروتئین های آهن دار به ترتیب با ثبت جذب آنها در طول موج های ۲۸۰ و ۴۲۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (Cintra6, GBC, Australia) محاسبه گردید.

اندازه گیری محتوای آهن کل: اندازه گیری

مقدار کل آهن در ریشه، ساقه و بذر پس از هضم اسیدی خاکستر آنها، با روش اسپکترومتری جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (AA-670G, SHIMADZO, Japan) انجام شد (Hajnoruzi *et al.*, 2011).

کمی کردن مقدار فریتین با روش ELISA:

برای کمی کردن مقدار فریتین با روش ساندویچ ELISA از کیت تشخیص فریتین ELISA (شرکت پیشتاز طب، تهران، ایران) استفاده شد. ۵۰ میکرولیتر از عصاره های حاوی فریتین استخراج شد و استانداردها به چاهک های پوشانده شده با آنتی بادی ضد فریتین اضافه و مقدار فریتین بر اساس کمپلکس تشکیل شده طی واکنش آنتی ژن-آنتی بادی مشخص شد. جذب نمونه ها در طول موج ۴۵۰ نانومتر توسط دستگاه ELISA plate reader (Anthos 2020, Biochrom, UK) خوانده شد.

محاسبه اندازه نانوذرات فریتین: اندازه

نانوذرات فریتین جدا شده بر اساس تغییر قطر هیدرو دینامیکی این ذرات توسط دستگاه (Zetasizer DLS (Malvern Nano ZS dynamic light scattering) (3000, HSA, UK) اندازه گیری شد. تحلیل داده های حاصل با نرم افزار Zetasizer نسخه ۶/۱۲ (Malvern, UK) انجام شد.

بررسی دو رنگ نمایی دورانی: بررسی تغییرات

ایجاد شده در ساختار دوم فریتین در اثر تیمار EMF با تکنیک دو رنگ نمایی دورانی (Circular Dicroism)

جداسازی نانوذرات فریتین: فریتین قسمت های

خوراکی گندم (بخش هوایی و دانه) با روش Lukac و همکاران (۲۰۰۹) و Galatro و همکاران (۲۰۱۲) با اندکی تغییر جداسازی شد. به طور خلاصه، ۲ گرم از نمونه ها در بافر استخراج سدیم فسفات ۱۰ میلی مولار با اسیدیته ۷/۲ حاوی سدیم کلرید ۱۰۰ میلی مولار، پلی وینیل پیرولیدون ۲ درصد و فنیل متانسولفونیل فلوراید ۱ میلی مولار عصاره گیری شدند. سوسپانسیون های حاصل در ۱۵۰۰۰ g به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفیوژ شدند. سپس، نیزیم کلرید در غلظت نهایی ۰/۷ درصد (وزن در حجم) به آرامی به بخش روشناور نمونه ها اضافه شده، پس از ۱۰ دقیقه قرارگیری روی یخ در ۲۶۰۰۰ g به مدت ۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفیوژ شدند. بار دیگر نیزیم کلرید (۱ درصد وزن در حجم) به بخش روشناور نمونه ها اضافه شد و پس از یک ساعت قرارگیری روی یخ، سدیم سترات (۲ درصد وزن در حجم) اضافه شد. بار دیگر، نمونه ها پس از ۲۰ دقیقه قرارگیری روی یخ در ۲۶۰۰۰ g به مدت ۵۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفیوژ شدند. رسوب حاصل در بافر سدیم فسفات (۱۰ میلی مولار با اسیدیته ۷/۲) حل شده سپس در ۱۰۰۰۰ g به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفیوژ شد. بخش روشناور برای آنالیزهای بعدی در فریزر ۲۰- درجه سانتیگراد نگهداری شد.

اندازه گیری پروتئین های آهن دار: برای

اندازه گیری نسبت پروتئین های آهن دار به کل پروتئین های دانه و اندام هوایی گندم در عصاره حاوی فریتین استخراج شده، از روش Galatro و همکاران

عصاره آنزیمی به مقدار مناسب بود. فعالیت آنزیمی با اندازه‌گیری تجزیه H_2O_2 و کاهش جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر و به ازای هر میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی محاسبه شد (Sahebamei *et al.*, 2007). پروتئین، با روش Bradford (۱۹۷۶) با استفاده از آلبومین سرم گاوی (BSA) به عنوان استاندارد اندازه‌گیری شد.

استخراج و سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز

(POX): نمونه‌ها (۰/۲ گرم) در ۳ میلی‌لیتر بافر سدیم فسفات ۶۰ میلی‌مولار با اسیدیت ۶/۱ عصاره‌گیری و همگنای حاصل در ۱۵۰۰۰g به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفیوژ شد. از بخش روشناور برای اندازه‌گیری فعالیت پراکسیداز استفاده شد. ۳ میلی‌لیتر ترکیب واکنش حاوی بافر سدیم فسفات ۶۰ میلی‌مولار با اسیدیت ۶/۱، گایاکول ۲۸ میلی‌مولار، H_2O_2 ۵ میلی‌مولار و عصاره آنزیمی به مقدار مناسب بود. فعالیت آنزیمی به صورت افزایش جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین نمونه محاسبه گردید (Abdolmaleki *et al.*, 2007).

سنجش ظرفیت جاروب‌کنندگی رادیکال‌های

آزاد (RSC): ابتدا ۰/۲ گرم از نمونه در ۳ میلی‌لیتر متانول مطلق عصاره‌گیری شده، در ۵۰۰۰g به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. بخش روشناور به نسبت ۱/۱۰ با متانول رقیق شده، سپس، رادیکال ۱ و ۱-دی فنیل-۲-پیکریل هیدرازیل با غلظت درصد ۰/۰۰۸ به آن اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفته، پس از آن جذب نوری آنها در طول موج ۵۱۷ نانومتر با اسپکتروفتومتر خوانده شد. تمامی مراحل در دمای ۴ درجه سانتیگراد انجام شد (Hajnoruzi *et al.*, 2011).

توسط دستگاه اسپکتروپلاریمتر Jasco مدل J-715 انجام شد.

نتایج به دست آمده بر حسب بیضی‌واری مولی (molar ellipticity) $([\theta] \text{ deg cm}^2 \text{ dmol}^{-1})$ و بر اساس میانگین جرم مولکولی اسیدهای آمینه (mean MRW) (residue weight) پروتئین محاسبه شد که برای فریتین گیاهی ۱۲۳/۶۲۶ به دست آمد. بیضی‌واری مولی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

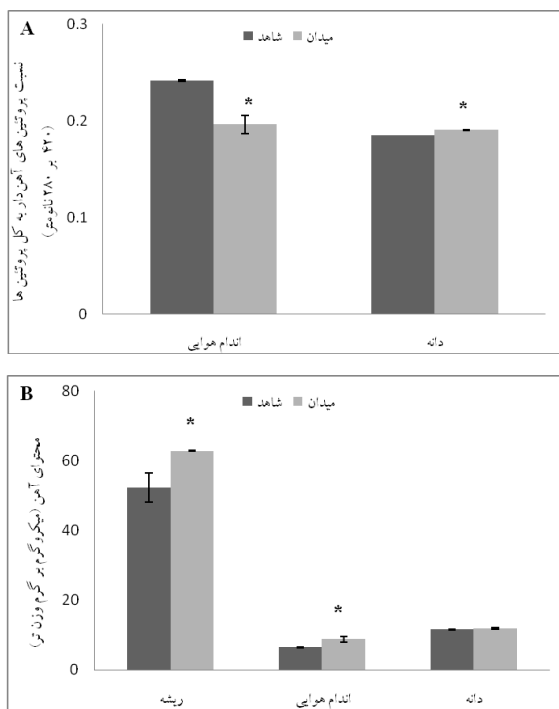
$$[\theta] = (\theta \times 100 \text{ MRW}) / Cl \quad \text{رابطه ۱:}$$

C: غلظت پروتئین بر حسب میلی‌گرم بر میلی‌لیتر،
l: طول کووت حاوی نمونه بر حسب سانتی‌متر و
 θ : شاخص بیضی‌واری اندازه‌گیری شده بر حسب درجه در طول موج (λ) است. مطالعات ساختاری در ناحیه far-UV CD (۱۹۰-۲۵۰ نانومتر) با غلظت ثابت ۰/۲ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر محلول فریتین در بافر Na-phosphate (۱۰ میلی‌مولار با اسیدیت ۷/۲) انجام شد.

تحلیل و پردازش طیف‌ها توسط نرم افزار اختصاصی J-715 که با استفاده از روش فوریه ترانسفورم آشفتگی‌های موجود در طیف را با کمترین تغییر شکل در پیک حذف می‌نماید، انجام شد.

استخراج و سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز

(CAT): نمونه‌ها (۰/۲ گرم) در ۳ میلی‌لیتر بافر سدیم فسفات ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیت ۶/۸ عصاره‌گیری و همگنای حاصل در ۱۲۰۰۰g به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفیوژ شد. از بخش روشناور برای سنجش فعالیت کاتالاز استفاده شد. ۳ میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی بافر سدیم فسفات ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیت ۶/۸، H_2O_2 ۱۰ میلی‌مولار و



شکل ۲- تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر نسبت پروتئین‌های آهن‌دار به کل پروتئین‌ها (A) و محتوای آهن کل در اندام‌های مختلف گیاهی (B). مقادیر، میانگین حداقل سه تکرار \pm انحراف معیار است. * نشان دهنده اختلاف معنی‌دار تیمار با شاهد در سطح $P < 0.05$ است.

مقدار فریتین اندام هوایی و دانه گیاهان تیمار شده با EMF نسبت به گیاهان شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافت (به ترتیب: ۳۲ و ۶۶ درصد) (شکل ۳-۳A). در مقایسه با گیاهان شاهد، قطر هیدرودینامیکی نانوذرات فریتین در اندام هوایی و دانه گیاهان تیمار شده با EMF به ترتیب: ۵ و ۱/۵ برابر افزایش معنی‌دار یافت (شکل ۳-۳B). در بررسی دو رنگ‌نمایی دورانی، آنالیز Far-UV CD spectra مخلوطی از ساختارهای مارپیچ آلفا (α -helix)، صفحات بتا (β -sheet) و مارپیچ تصادفی (random coil) را در فریتین‌های جدا شده از اندام هوایی و دانه گیاهان شاهد نشان داد (شکل ۳-۳C و ۳-۳D). همچنین، آنالیز CD نشان داد که تیمار EMF هر

سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشا

(LPO): ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه در ۳ میلی‌لیتر محلول درصد ۱۰ (حجم/وزن) تری کلرو استیک اسید (TCA) عصاره‌گیری شد. سپس، نمونه‌ها در ۱۲۰۰۰ g به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. به ۱ میلی‌لیتر از بخش روشن‌آور حاصل، ۱ میلی‌لیتر تیوباربتوریک اسید (TBA) درصد ۰/۵ افزوده شد و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. پس از سرد شدن لوله‌ها در یخ، جذب در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر خوانده شد. میزان MDA با استفاده از ضریب ثابت $\epsilon = 155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ محاسبه گردید (Sahebamei *et al.*, 2007).

تحلیل آماری: کلیه آنالیزهای بیوشیمیایی فوق با

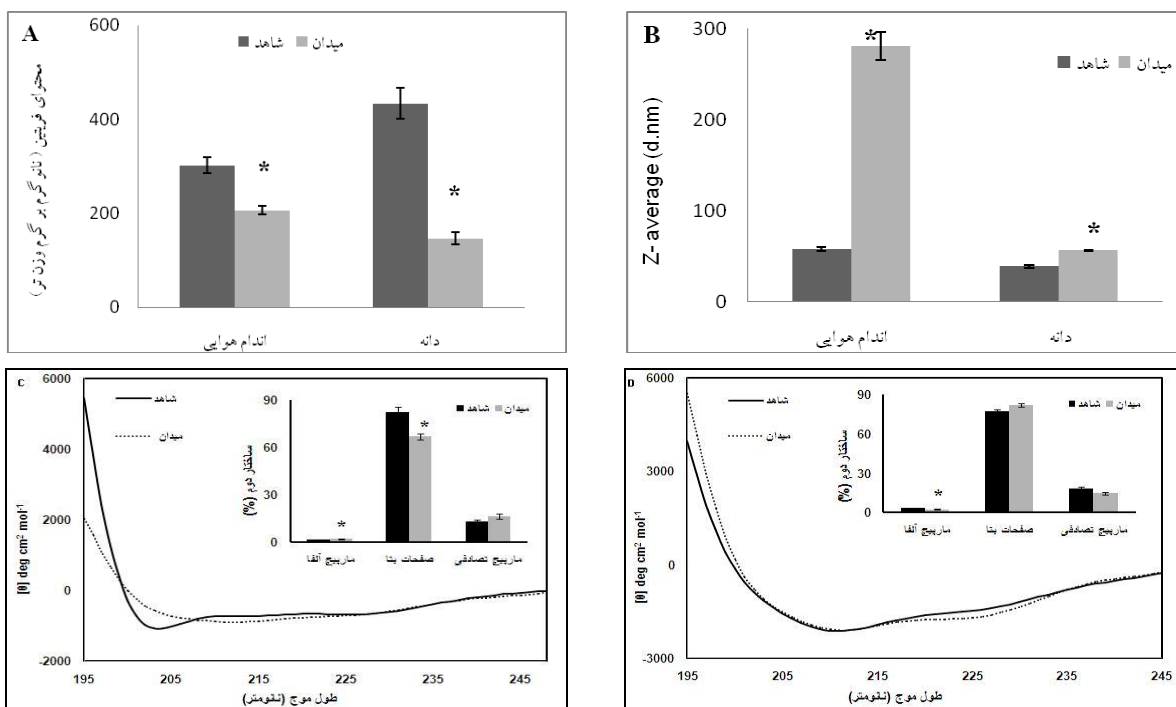
سه بار تکرار مستقل و هر یک حداقل با سه نمونه انجام شد. برای تمام داده‌ها میانگین و انحراف معیار (SD) محاسبه شد. معنی‌دار بودن یافته‌های حاصل با استفاده از Student's t-test و نرم‌افزار Excel در سطح $P < 0.05$ ارزیابی شد.

نتایج

تیمار گیاهان گندم در مرحله زایشی با میدان الکترومغناطیسی باعث کاهش معنی‌دار نسبت پروتئین‌های آهن‌دار به کل پروتئین‌ها (۱۹ درصد) در اندام هوایی و افزایش معنی‌دار این نسبت در دانه این گیاهان (۱/۰۳ برابر) در مقایسه با گیاهان شاهد گردید (شکل ۲-۳A). مقدار آهن در ریشه و اندام هوایی گیاهان تیمار شده نسبت به گیاهان شاهد به ترتیب ۱/۲ و ۱/۴ برابر افزایش معنی‌دار یافت؛ هر چند تغییر این میزان در دانه‌ها معنی‌دار نبود (شکل ۲-۳B).

طور کلی، تیمار میدان الکترومغناطیسی ساختار دوم فریتین اندام هوایی را نسبت به گیاهان شاهد ۱۲ درصد کاهش داد ولی تأثیر معنی‌داری بر ساختار دوم فریتین دانه نداشت (شکل ۳-C و D).

چند باعث افزایش ۱/۵ برابری ساختار ماریچج آلفا و کاهش ۱۹ درصدی ساختار صفحات بتا در ساختار دوم فریتین‌های جدا شده از اندام هوایی و کاهش ۳۲ درصدی ساختار ماریچج آلفا فریتین‌های دانه شد، ولی به



شکل ۳- ویژگی‌های نانوذرات فریتین جدا شده از اندام هوایی و دانه گیاهان گندم شاهد و تیمار یافته با میدان الکترومغناطیسی (۱۰ کیلوهرتز)، مقدار فریتین بر اساس روش ELISA، قطر هیدرودینامیکی حاصل از DLS نانوذرات فریتین، C و D) به ترتیب نمایش طیف ساختار دوم فریتین جدا شده از اندام هوایی و دانه که حاصل آنالیز far UV CD spectral در محدوده ۱۹۵-۲۴۵ نانومتر است. مقادیر، میانگین حداقل سه تکرار ± انحراف معیار است. * نشان دهنده اختلاف معنی‌دار تیمار با شاهد در سطح $P < 0.05$ است.

داد (جدول ۲). این در حالی بود که ظرفیت جاروب‌گری رادیکال‌های آزاد و پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی تحت تأثیر معنی‌دار این تیمار قرار نگرفتند (جدول ۲).

تیمار با EMF فعالیت آنزیم کاتالاز را در دانه‌های این گیاهان نسبت به گیاهان شاهد به طور شایان توجهی افزایش داد (۸/۵ برابر)، در حالی که فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۶۷/۳ برابر کاهش

جدول ۲- تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر فعالیت سیستم آنتی اکسیدان دانه‌های گندم. مقادیر، میانگین سه تکرار \pm انحراف معیار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح $P < 0.05$ است.

پراکسیداسیون لیپیدهای غشا (نسبت میلی مولار مالون‌دی‌آلدئید بر گرم وزن تر)	ظرفیت جاروب‌گری رادیکال‌های آزاد (DPPH%)	پراکسیداز (نسبت تغییر جذب در ۴۷۰ نانومتر به میلی گرم پروتئین)	کاتالاز (نسبت تغییر جذب در ۲۴۰ نانومتر به میلی گرم پروتئین)	
۶/۸۸±۰/۴۷	۴۴/۸۶±۲/۴	۱۷/۶۲±۱/۶۶	۰/۰۶±۰/۰۰	شاهد
۷/۳۴±۰/۳	۴۲/۴۹±۱/۳۱	*۰/۲۶±۰/۰۱	*۰/۵۴±۰/۰۵	میدان الکترومغناطیسی

بحث

EMF بیشتر از گیاهان شاهد بود. با وجود داده‌های فراوان راجع به تأثیر کاربرد میدان الکتریکی خارجی بر کانال‌های یونی در گیاهان، اطلاعات کافی در مورد مکانیسم دقیق تأثیر میدان مغناطیسی بر جذب یون‌ها از این کانال‌ها وجود ندارد (Serdyukov and Novitskii, 2013). پژوهش‌ها نشان داده است که هر گاه یک نانو کریستال فرّو مگنتیک (نظیر فریتین) به یک کانال متصل شود، پتانسیل تأثیر گذاری مستقیم بر انتقال یون را دارد و می‌تواند حرکت یون‌ها را از خلال غشا تغییر دهد (Kirschvink *et al.*, 1992). گیاهان به شیوه‌های مختلف از سمّیت آهن انباشته شده اجتناب می‌ورزند و تعادل آهن را به شدت کنترل می‌کنند (Briat *et al.*, 2010). یکی از پروتئین‌های مهم که هنگام بررسی تأثیرات میدان مغناطیسی در سطح مولکولی مورد توجه قرار می‌گیرد، پروتئین ذخیره‌کننده آهن یعنی فریتین است؛ زیرا این پروتئین در میان تمام پروتئین‌ها بیشترین خاصیت مغناطیسی را دارد (Briat *et al.*, 2010). فریتین از رسوب مستقیم کلئیدهای هیدروکسید فیریک با اکسید کردن Fe^{2+} و ذخیره آن در هسته آهنی خود جلوگیری می‌کند (Laulhere and Briat, 1993). با وجود افزایش محتوای آهن در اندام هوایی گیاهان گندم تیمار شده با

میدان‌های الکترومغناطیسی از عوامل محیطی اجتناب‌ناپذیر برای موجودات زنده هستند که پژوهش‌های متعددی برای بررسی آثار آن انجام شده است. شواهدی وجود دارد که میدان‌های مغناطیسی تغییراتی را در نفوذپذیری غشا و میزان رشد سلول ایجاد می‌کنند، همچنین موجب برهم کنش با یون‌ها و مولکول‌های آلی مانند پروتئین‌ها و نوکلئیک اسیدها می‌شوند (Arbabian و همکاران، ۲۰۱۰). گیاهان سبز برای رشد خود به منبع پیوسته‌ای از آهن نیاز دارند زیرا آهن از برگ‌های پیر به برگ‌های جوان حرکت نمی‌کند (Brown, 1978). در شرایطی که غلظت آهن کافی و زیاد باشد، توسط گروه بزرگی از ناقل‌های فلز (NRAMP, Natural Resistance Associated Macrophage Protein) جذب می‌شوند که این ناقل‌ها توانایی انتقال Zn ، Ni ، Mn ، Cu ، Co ، Cd را دارند (Curie and Briat, 2003). محتوای آهن ریشه و اندام هوایی گیاهان تیمار شده با میدان به طور معنی داری بیشتر از گیاهان شاهد بود ولی این میزان در دانه‌ها تحت تأثیر قرار نگرفت. این نتایج پیشنهاد می‌کند که EMF باعث افزایش جذب آهن به وسیله ریشه‌ها شده است، به همین سبب محتوای آهن کل گیاهان تیمار شده با

نانوذرات سوپر مغناطیسی فری هیدرات شد. این پدیده که ناشی از فاصله زمانی بین تأثیر میدان تا مغناطیسی شدن نانوذره است ساختار پتید احاطه کننده نانوذره فری هیدراتی را بر هم زد و باعث تغییر دینامیک مولکولی و عملکرد پروتئین گردید که حاصل آن خروج آهن یا به بیان بهتر کاهش ۲۰ درصدی ورود آهن به فریتین بود (Cespedes *et al.*, 2010). تأثیر برگشت‌پذیر میدان‌های الکترومغناطیسی بر خمش باندهای N-H و ارتعاش کششی باندهای C-N در پیوندهای پتیدی و تغییر در ساختارهای مارپیچ آلفا و صفحات بتای پروتئین‌های غشایی در سلول‌های جانوری نشان داده شده است (Ikehara *et al.*, 2003). برخلاف فریتین انسانی و جانوری، پایداری فریتین گیاهی به خوبی مطالعه نشده است (Theil and Briat, 2004) و پژوهش حاضر نخستین گزارش در مورد تغییرات اندازه و ساختار دوم این پروتئین مقاوم در اثر تیمار گیاهان با میدان مغناطیسی است. گرچه مکانیسم دقیق این آثار هنوز نامشخص است و نیاز به پژوهش‌های بیشتر دارد. اما این احتمال وجود دارد که میدان الکترومغناطیسی به کار رفته در مطالعه حاضر با مکانیسمی مشابه سبب تغییر ساختار و اندازه مولکول‌های فریتین گندم شده باشد.

برخی از پژوهش‌ها تأثیر میدان مغناطیسی را بر سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاهان نشان می‌دهند (Sahebjamei *et al.*, 2007؛ Serdyukov and Novitskii, 2013). تیمار گیاهان گندم در مرحله زایشی با میدان الکترومغناطیسی، فعالیت آنزیم کاتالاز دانه را نسبت به گیاهان شاهد به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد، ولی فعالیت آنزیم پراکسیداز را به طور

EMF، مقدار نانوذرات فریتین و همچنین پروتئین‌های آهن‌دار آنها در مقایسه با گیاهان شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافته است. البته شایان ذکر است که در کنار فریتین، واکنش‌های زیادی درون سلول‌های گیاهی وجود دارند که قادر به انباشته‌سازی و سم‌زدایی زیادی آهن در درون خود هستند (Lescure *et al.*, 1991). Ayala-Vela و همکاران (۲۰۰۸) دریافتند که هیچ رابطه‌ای بین میزان بیان فریتین و مقدار پروتئین آن با محتوای آهن رقم‌های مختلف باقلاییان معمولی وجود ندارد. بنابراین، در دانه گیاهان تیمار شده با میدان با وجود تغییر نکردن میزان آهن، میزان فریتین در مقایسه با گیاهان شاهد کاهش معنی‌دار داشت ولی نسبت پروتئین‌های آهن‌دار به کل پروتئین‌ها افزایش یافت.

در مقایسه با سایر پروتئین‌ها، پایداری فریتین گیاهی به دلیل ساختار توپ مانند آن که مقدار زیادی ساختار مارپیچ آلفا دارد، بسیار بیشتر است (Zhang *et al.*, 2012). بررسی دو رنگ‌نمایی دورانی نشان داد که ساختار مارپیچ آلفا در ساختار دوم فریتین‌های جدا شده از دانه گیاهان تیمار یافته با EMF و ساختار صفحات بتا در فریتین‌های جدا شده از اندام هوایی این گیاهان در مقایسه با گیاهان شاهد کاهش معنی‌دار یافته، به سمت از هم پاشیده شدن ساختار به ویژه در فریتین‌های جدا شده از اندام هوایی می‌رود. علت دیگر صحت این ادعا، افزایش قطر هیدرودینامیکی این ذرات در اثر تیمار با میدان الکترومغناطیسی است. پژوهشگران در یک مطالعه تجربی بر روی مولکول‌های فریتین طحال اسب نشان دادند که میدان‌های مغناطیسی ضعیف حاصل از امواج رادیویی سبب افزایش انرژی درونی

ثابت ماندن ظرفیت جاروب گری رادیکال‌های آزاد نیز احتمالاً حاصل جبران نقش فریتین به وسیله کاتالاز است. نتایج پیشین نگارندگان در مورد تیمار گیاه گندم با میدان الکترومغناطیسی (۱۰ کیلوهرتز) در مرحله جوانه‌زنی نتایج مشابهی در مورد فعالیت سیستم آنتی اکسیدانی نشان داد (Payez et al., 2013).

جمع‌بندی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تیمار میدان الکترومغناطیسی (۱۰ کیلوهرتز) به مدت ۴ روز، هر روز ۵ ساعت از طریق ایجاد تغییر معنی دار در میزان آهن و پروتئین‌های آهن دار به ویژه فریتین، اندازه و ساختار آن و تحریک سیستم آنتی اکسیدانی بر گیاهان گندم در مرحله زایشی تأثیر می‌گذارد. در مجموع، می‌توان تأثیر این میدان الکترومغناطیسی را بر گیاهان گندم در قالب هر سه مکانیسم جفت رادیکال، فری‌مگنتیسم و یون سیکلوترون توضیح داد، افزون بر این که مطالعه حاضر می‌تواند یک شاهد تجربی برای مکانیسم فری‌مگنتیسم باشد که در حد تئوری مطرح بوده است.

سپاسگزاری

نگارندگان از آقای دکتر اباذر حاج نوروزی (گروه فیزیک دانشگاه شاهد) به خاطر همکاری صمیمانه و خلاقیت در طراحی سیستم‌های مورد استفاده در این پژوهش صمیمانه تشکر می‌کنند.

چشمگیری کاهش داد. همان طور که قبلاً اشاره شد یکی از نقش‌های مهمی که معمولاً به فریتین نسبت داده می‌شود ذخیره آهن به شکل Fe^{3+} و در نتیجه جلوگیری از ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن ناشی از به راه افتادن واکنش فنتون است. ظاهراً کاهش فریتین در بذر گندم‌های تیمار شده با میدان الکترومغناطیسی دو پدیده را به همراه داشته است: الف) گسیل شدن آهن به سوی مولکول‌های پروتئینی آهن‌دار دیگر (که نتیجه آن افزایش نسبت پروتئین‌های آهن‌دار به کل محتوای پروتئین بذر است) و ب) محول شدن وظیفه جمع‌آوری گونه‌های فعال اکسیژن به سایر آنتی اکسیدان‌ها نظیر کاتالاز. جالب آن که آنزیم کاتالاز نیز یک هم پروتئین است و فعالیت آن با سطح آهن تنظیم می‌شود (Chen 1984). فعالیت این آنزیم به نوبه خود تنظیم‌کننده فعالیت سایر آنزیم‌های جاروب‌کننده پراکسید هیدروژن از جمله پراکسیداز است (Sahebjamei et al., 2007). بنابراین، شاید بتوان گفت که با توجه به فعالیت بالای کاتالاز در نمونه‌های تیمار شده با میدان نیازی به فعالیت شدید آنزیم پراکسیداز نبوده است.

افزایش شایان توجه فعالیت آنزیم کاتالاز که جاروب‌کننده اصلی پراکسید هیدروژن است (Sahebjamei et al., 2007) در گیاهان گندم تیمار شده با میدان به نحو موثری رادیکال‌های آزاد اکسیژن را جاروب کرده، به عدم افزایش پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و حفظ تمامیت غشا منجر گردید.

منابع

- Abdolmaleki, P., Ghanati, F., Sahebjamei, H. and Sabet Sarvestani, A. (2007) Peroxidase activity, lignifications and promotion of cell death in tobacco cells exposed to static magnetic field. *Environmentalist* 27: 435-440.

- Aladadjiyani, A. (2002) Study of the influence of magnetic field on some biological characteristics of *Zea mays*. *Journal of Central European Agriculture* 3(2): 89-94.
- Arbabian, S., Majd, A. and Salaripour, S. (2010) The effect of electromagnetic fields on the vegetative organs, pollen development, germination and pollen tube growth of soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Cell and Tissue* 1(1): 35-42 (in Persian).
- Ayala-Vela, J., Gui'a-Gonzalez, M., Espinosa-Huerta, E., Acosta-Gallegos, J. A., Guzman-Maldonado, S. H. and Mora-Aviles, M. A. (2008) Iron content and ferritin gene expression in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultura Tecnica en Mexico* 34: 481-489.
- Belyavskaya, N. A. (2004) Biological effects due to weak magnetic field of plants. *Advances in Space Research* 34: 1566-1574.
- 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.
- Briat, J. F., Lobreaux, S., Grignon, N. and Vansuyt, G. (1999) Regulation of plant ferritin synthesis: how and why?. *Cellular and Molecular Life Sciences* 56: 155-166.
- Briat, J. F., Ravet, K., Arnaud, N., Duc, C., Boucherez, J., Touraine, B., Cellier, F. and Gaymard, F. (2010) New insights into ferritin synthesis and function highlight a link between iron homeostasis and oxidative stress in plants. *Annals of Botany* 105: 811-822.
- Brown, J. C. (1978) Mechanism of iron uptake by plants. *Plant, Cell and Environment* 1(4): 249-257.
- Chen, T. (1994) The Effects of cadmium and iron on catalase activities in *Tubifex*. *International Journal of Toxicology* 13: 112-120.
- Curie, C. and Briat, J. F. (2003) Iron transport and signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology* 54: 183-206.
- Galatro, A., Robello, E. and Puntarulo, S. (2012) Soybean ferritin: isolation, characterization, and free radical generation. *Journal of Integrative Plant Biology* 54(1): 45-54.
- Galland, P. and Pazur, A. (2005) Magnetoreception in plants. *Journal of Plant Research* 118: 371-389.
- 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 bacilicum*. *Environmentalist* 27: 429-434.
- Goswami, B., Tayal, D. and Mallika, V. (2009) Ferritin: a multidimensional bio marker. *The Internet Journal of Laboratory Medicine* 3(2) DOI: 10.5580/23e0.
- Green, L. M., Miller, A. B., Agnew, D. A., Greenberg, M. L., Li, J., Villeneuve, J. P. and Tibshirani, R. (1999) Childhood leukaemia and personal monitoring of residential exposures to electric and magnetic fields in Ontario, Canada. *Cancer Causes Control* 10: 233-243.
- Guertin, R. P., Harrison, N., Zhou, Z. X., McCall, S. and Drymiotis, F. (2007) Very high field magnetization and AC susceptibility of native horse spleen ferritin. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 308: 97-100.
- 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(10): 1123-1128.
- Ikehara, T., Yamaguchi, H., Hosokawa, K., Miyamoto, H. and Aizawa, K. (2003) Effects of ELF magnetic field on membrane protein structure of living HeLa cells studied by fourier transform infrared spectroscopy. *Bioelectromagnetics* 4:457-464.

- Kirschvink, J. L., Kobayashi-Kirschvink, A. and Woodford, B. J. (1992) Magnetite biomineralization in the human brain. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 89: 7683-7687.
- Lacy-Hulbert, A., Metcalfe, J. C. and Hesketh, R. (1998) Biological response to electromagnetic fields. *The FASEB Journal* 12: 395-420.
- Laulhere, J. and Briat, J. (1993) Iron release and uptake by plant ferritin: effects of pH, reduction and chelation. *Biochemical Journal* 290: 693-699.
- Lescure, A., Proudhon, D., Pesey, H., Ragland, M., Theil, E. C. and Briat, J. F. (1991) Ferritin gene transcription is regulated by iron in soybean cell cultures. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 88: 8222-8226.
- Liboff, A. R., McLeod, B. R. and Smith, S. D. (1989) Rotating magnetic fields and iron cyclotron resonance. *Journal of Bioelectronics* 8: 119-125.
- Lukac, R. J., Aluru, M. R. and Reddy, M. B. (2009) Quantification of ferritin from staple food crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57: 2155-2161.
- Payez, A., Ghanati, F., Behmanesh, M., Abdolmaleki, P., Hajnorouzi, A. and Rajabbeigi, E. (2013) Increase of seed germination, growth and membrane integrity of wheat seedlings by exposure to static and electromagnetic fields. *Electromagnetic Biology and Medicine* 32: 417-429.
- Picard, V., Epsztejn, S., Santambrogio, P., Cabantchik, Z. I. and Beaumont, C. (1998) Role of ferritin in the control of the labile iron pool in murine erythroleukemia cells. *Journal of Biological Chemistry* 273: 15382-15386.
- Robertson, I. G. C., Wilson, W. R., Dawson, B. V., Zwi, L. J., Green, A. W. and Boys, J. T. (1996) Evaluation of potential health effects of 10 kHz magnetic fields: a short-term mouse toxicology study. *Bioelectromagnetics* 17: 111-122.
- Sahebamei, H., Abdolmaleki, P. and Ghanati, F. (2007) Effects of magnetic field on the antioxidant enzyme activities of suspension-cultured tobacco cells. *Bioelectromagnetics* 28: 42-47.
- Scaiano, J. C., Cozens, F. L. and Mclean, J. (1994) Model for the rationalization of magnetic field effects *in vivo*. Application of the radical-pair mechanism to biological systems. *Photochemistry and Photobiology* 59: 585-589.
- Serdyukov, Y. A. and Novitskii, Y. I. (2013) Impact of weak permanent magnetic field on antioxidant enzyme activities in radish seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology* 60(1): 69-76.
- Sobczak, B. and Law Kula, A. (2002) Effects of electromagnetic field on free-radical processes in steelwork. *Journal of Occupational Health* 44: 230-233.
- Theil, E. C. and Briat, J. F. (2004) Plant ferritin and non-heme iron nutrition in humans. *Harvest Plus, Oakland*.
- Zhang, T., Lv, C., Yun, Sh., Liao, X., Zhao, G. and Leng, X. (2012) Effect of high hydrostatic pressure (HHP) on structure and activity of phytoferritin. *Food Chemistry* 130: 273-278.

Interaction of electromagnetic field (10 kHz) with ferritin nanoparticles and antioxidant system of wheat at reproductive phase

Atefeh Payez¹, Faezeh Ghanati^{1*}, Parviz Abdolmaleki² and Mehrdad Behmanesh³

¹ Department of Plant Biology, School of Biological Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Department of Biophysics, School of Biological Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Department of Genetics, School of Biological Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Effects of magnetic and electromagnetic fields on the living organisms have drawn attention in the recent years, but their exact mechanisms are still unclear. In the present study, the effects of 10 kHz electromagnetic magnetic field on some physiological parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) were evaluated. The plants in their reproductive phase were treated for 4 days, each 5 h. Then the iron content, ratio of Fe-bound proteins to total proteins, content, size and secondary structure of ferritin nanoparticles as well as activity of antioxidant system were evaluated. The results showed that in comparison with the control plants, treatment with electromagnetic field significantly increased the iron contents of all organs except seeds and ratio of Fe-bound proteins to total proteins of seeds. The content and secondary structure of ferritin nanoparticles in edible parts of magnetic field treated plants were decreased significantly, but the hydrodynamic diameter was increased significantly compared to the control plants. This treatment also caused the significant increase of catalase activity and remarkably decreased peroxidase activity of wheat seeds, which in turn led to maintenance of membrane lipid peroxidation. These results suggested that electromagnetic field with applied frequency affected wheat plants by changing the content of total iron, Fe-bound proteins special ferritin and its characteristics and activation of antioxidant system.

Key words: Iron, Wheat, Electromagnetic field, Ferritin nanoparticles

* Corresponding Author: ghangia@modares.ac.ir