

بررسی تأثیرات فری اکسامین B بر رشد و محتوای کلروفیل نخود در مطالعه درشیشه

سولماز خسروی^۱، پریسا کوپاز^۲، داوود نادری^۳، نرگس مجتهدی^۴ و اکرم صادقی^۵

^۱گروه پژوهشی مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ ^۲گروه پژوهشی فیزیولوژی مولکولی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ ^۳دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان، اصفهان، ایران؛ ^۴گروه پژوهشی کشت بافت و سلول، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ ^۵گروه پژوهشی بیوتکنولوژی میکروبی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

مسئول مکاتبات: اکرم صادقی، aksadeghi@abrii.ac.ir

چکیده. در دسترس بودن آهن برای ریشه‌ها به عنوان یک عامل مهم در تولیدات گیاهی اثبات شده است. اضافه کردن کلات‌های شیمیایی آهن به خاک با آنکه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست روشی معمول است. علاوه بر این، استفاده از کودهای شیمیایی آهن مشکلات زیادی مانند آلودگی مواد غذایی و محیط زیست را در پی دارد. توسعه کلاتورهای آهن طبیعی میکروبی از خانواده سیدروفورهای هیدروکساماتی مانند دسفری اکسامین B برای تولید یک منبع آهن ایمن و موثر ممکن است بهترین روش برای مقابله با کمبود آهن گیاه و جلوگیری از آلودگی عوامل شیمیایی باشد. در این مطالعه قابلیت فری اکسامین B برای استفاده به عنوان یک منبع آهن جایگزین در کشت بافت گیاه نخود بررسی شد. بدین منظور جنین بذرهاي نخود پس از ضد عفونی سطحی در محیط کشت MS و MS ۱/۲ حاوی ۳ درصد سوکروز و ۰/۸ درصد آگار همراه با فری اکسامین B و با Fe-EDTA کشت شد. طول ریشه و ساقه، وزن خشک ریشه و ساقه، وزن تر و خشک گیاهچه و کلروفیل a و b اندازه‌گیری شد. بنا بر نتایج حاصل، فری اکسامین B در مقایسه با Fe-EDTA موجب افزایش کلروفیل a و b نشد. اگر چه ریشه زایی (۲۲ درصد)، وزن خشک گیاهچه (۳۸ درصد)، وزن خشک ریشه (۷۵ درصد) و ساقه (۲۲ درصد) در MS حاوی فری اکسامین B در مقایسه با Fe-EDTA به طور معنی دار ($p \leq 0.05$) افزایش پیدا کرد. بنابراین نتایج فری اکسامین B به عنوان یک منبع آهن مقرون به صرفه و کارآمد برای کاهش کمبود آهن گیاهان در شرایط در شیشه معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی. سیدروفور، کشت بافت، کلات آهن، کمبود آهن، کود شیمیایی

In vitro studies on effects of Ferrioxamine B on chickpea (*Cicer arietinum* L.) growth and chlorophyll content

Solmaz Khosravi¹, Parisa Koobaz², Davood Naderi³, Narges Mojtahedi⁴ & Akram Sadeghi^{5*}

¹Department of Genetic Engineering and Biosafety, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; ²Department of Molecular Physiology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; ³Young Researchers Club, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran; ⁴Department of Tissue and Cell Culture, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; ⁵Department of Microbial Biotechnology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
Correspondent author: Akram Sadeghi, aksadeghi@abrii.ac.ir

Abstract. The availability of iron for roots has been demonstrated as a critical factor in plant production. The addition of synthetic iron chelates to soil is a common practice in agriculture, which is not economically beneficial. Besides, chemical iron fertilizers cause many problems such as food contamination and environmental pollution. Development of natural Ferrioxamine B as an efficient and safe iron source may be the best strategy to overcome plant iron deficiency and prevention of synthetic agent pollution. The present study investigates the ability of a hydroxamate type siderophores

(Ferrioxamine B) as a substitute Fe source during tissue culture of chickpea plants. For this purpose, embryo axes from chickpea seeds were surface sterilized and cultured in 1/2MS and MS culture media including 3% sucrose and 0.8% agar with Ferrioxamine B or Fe-EDTA. The root and shoot length, shoot and root dry weight, total fresh and dry weight, as well as chlorophylls a and b were analysed. Results indicated that Ferrioxamine B did not increase chlorophylls a and b in comparison with Fe-EDTA. However, rooting (22%), total dry weight (38%) and root (75%) and shoot (22%) dry weight significantly ($p \leq 0.05$) increased in MS containing Ferrioxamine B in comparison with Fe-EDTA. Consequently, Ferrioxamine B is introduced as a cost-effective and applicable Fe source to favour iron deficiency *in vitro*.

Keywords. chemical fertilizer, iron chelate, iron deficiency, siderophore, tissue culture

مقدمه

کمپلکس فری اکسامین B ($C_{25}H_{45}FeN_6O_8$) را تشکیل می دهد. دفع این کمپلکس از طریق ادرار از رسوب آهن در بافت های بدن بیماران و عوارض آن جلوگیری می کند (Mobarra et al., 2016). استفاده مستقیم از سیدروفورهای میکروبی به عنوان منبع آهن بررسی شده و تاثیر آن در ممانعت از تنش کمبود آهن و افزایش محصول گزارش شده است (Wang et al., 1993). از طرف دیگر سیدروفور یکی از ترکیباتی است که سیستم ایمنی گیاه را در برابر طیف وسیعی از بیمارگرهای گیاهی تحریک می کند (Bloemberg & Lugtenberg, 2001). گونه هایی از جنس باکتری استرپتومایسس توانایی تولید سیدروفور را دارند (Muller & Roymond, 1981; Neilands, 1984). با وجود آن که بعضی از گونه های نوکاردیاهای، میکرومونوسپورها، آرتروباکترها، کروموباکتریوم ها و سودمونوس ها توانایی تولید دسفری اکسامین ها را دارند اما منابعی که نسبت به سایرین ارجحیت دارند کشت سویه هایی از جنس استرپتومایسس است. این باکتری ها هر ده نوع دسفری اکسامین-A، G منجمله نوع B را بعنوان مهمترین نوع تولید می کنند (Neilands, 1981). در حال حاضر استفاده مستقیم از کلاتورهای آهن شیمیایی مانند Fe-EDTA در کشاورزی معمول است (Barton & Abadía, 2006). اغلب این کلاتورهای شیمیایی در خاک های قلیایی کارایی خوبی ندارند (Hashemimajd & Jamaati-e-Somarin, 2011) و علاوه بر آن از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند (Barton & Abadía, 2006). از طرف دیگر آلودگی های محیطی ناشی از مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی نیز مسئله دیگری است که باید به آن توجه شود. یکی دیگر از مشکلات استفاده از کودهای شیمیایی آهن جذب مستقیم ترکیب کامل آهن-کلاتور (کلات آهن) توسط گیاه است. تجمع EDDHA که یکی از کلاتورهای آهن است در میوه گزارش شده است (Bienfait et al., 2004). بنابراین تحقیق و توسعه بر

آهن یکی از عناصر ضروری برای بسیاری از عملکردهای زیستی گیاهان است (Guerinot & Yi, 1994). گیاهان بر اساس نحوه جذب آهن به دو گروه تقسیم می شوند. در تعدادی از گیاهان گروه اول در پاسخ به کمبود آهن سیستم انتقال آهن با جذب بالا فعال می شود که به واسطه آن می توانند از عوامل کلات کننده آهن میکروبی که سیدروفور نامیده می شوند استفاده کنند (Romheld & Marschner, 1986). سیدروفورها آهن را از محیط جدا کرده و به وسیله سیستم های برداشت وابسته به انرژی (انتقال فعال) آن را به داخل سلول منتقل می کنند. این ترکیبات که در شرایط کمبود آهن توسط میکروارگانیسم ها تولید می شوند به همراه مولکول های رسپتور نقش اصلی را در سیستم انتقال آهن به عهده دارند. چنین سیستم هایی برای رفع احتیاجات سلول باکتری در شرایط کمبود آهن ضروری هستند (Kraemer, 2004). گیاهان دو لپه قادر به جذب Fe^{+} از سیدروفورهای میکروبی هستند (Crowley et al., 1991). حضور سیدروفورهای هیدروکساماتی در خاک در مقادیر قابل توجه (10^{-8} تا 10^{-7} مول) گزارش شده است (Powell et al., 1980). سیدروفورهای هیدروکساماتی شامل سه گروه ثانویه هیدروکسامات هستند $C(=O)N-(OH)-R$ که R یک اسید آمینه و یا مشتقی از آن است. هر گروه هیدروکسامات دو اکسیژن دارد که یک لیگاند دو بانندی جهت اتصال با آهن تشکیل می دهد. بنابراین هر مولکول سیدروفور هیدروکساماتی یک کمپلکس اکتاهدرال شش بانندی با آهن سه ظرفیتی تشکیل می دهد (Mawji et al., 2008). همچنین گزارش شده که سیدروفورهای هیدروکساماتی بویژه دسفری اکسامین B ($C_{25}H_{45}N_6O_8$) عمده ترین نوع سیدروفور موجود در خاک است (Crowley et al., 1988). دسفری اکسامین B برای تهیه داروی دسفرال استفاده می شود. دسفرال با اتصال به آهن موجود در خون بیماران بتاتالاسمی، که بر اثر تزریق پی در پی خون تجمع پیدا کرده

ریشه‌ها برای کاهش آلودگی و بر طرف نمودن باقیمانده‌های محیط کشت و آگار با آب مقطر استریل شسته شد. طول ساقه و ریشه، وزن تر و خشک گیاهچه و وزن خشک ساقه و ریشه به تفکیک اندازه‌گیری شد. همچنین مورفولوژی و سلامت گیاهچه بر اساس ضخامت ساقه و شاخه‌ها و زردی و سر سوختگی ساقه بررسی و به صورت کیفی سنجش شد.

اندازه‌گیری کلروفیل a و b

برای اندازه‌گیری کلروفیل a و b و محتوای کلروفیل کل از برگ‌های تازه گیاهچه استفاده شد. رنگدانه‌های کلروفیل با استفاده از ساییدن برگ‌ها در استون ۸۰ درصد (نسبت ماده به حلال ۵۰:۱) در دمای اتاق و تاریکی استخراج شد. جذب هر نمونه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Carry 300) در دو طول موج ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر خوانده شد. مقدار کمی کلروفیل a و b و مجموع آن‌ها بر اساس روش آرون (1949) و با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد.

$$\text{Chl a (mg g}^{-1} \text{ tissue)} = (12.25 A_{663} - 2.79 A_{645}) \times V/1000W$$

$$\text{Chl b (mg g}^{-1} \text{ tissue)} = (21.50 A_{645} - 5.10 A_{663}) \times V/1000W$$

$$\text{Chl a+b (mg g}^{-1} \text{ tissue)} = (7.15 A_{663} + 18.71 A_{645}) \times V/1000W$$

که در این رابطه Chl a مقدار کلروفیل a، Chl b مقدار کلروفیل b، V حجم نهایی عصاره در استون ۸۰ درصد و W وزن بافت تازه بر حسب گرم است.

تحلیل آماری

این آزمایش به صورت طرح کامل تصادفی انجام شد. تجزیه واریانس داده‌ها نرم‌افزار MSTATC (Bricker, 1991) انجام شد. مقایسه میانگن تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد.

نتایج

بررسی‌های مورفولوژیکی

علایم کمبود آهن به دو صورت زردی برگ‌ها (پس از ۱۰ روز) و سر سوختگی (نکروز) نوک ساقه (پس از ۳۰ روز) در محیط MS بدون آهن ظاهر شد. این علائم زمانی که غلظت مواد تشکیل دهنده محیط کشت به نصف کاهش یافت (MS ۱/۲) نیز مشاهده شد. گیاهچه‌های کشت شده در محیط حاوی آهن در مقادیر استاندارد (۳۷/۵ میلی گرم/لیتر) از هر دو نوع فری اکسامین B و یا

روی کلاتوره‌های طبیعی آهن مانند دسفری اکسامین B برای تولید منبع آهن طبیعی و کارآمد جهت برطرف کردن کمبود آهن گیاهان و همچنین اجتناب از آلودگی با عوامل شیمیایی ضروری است. در این مطالعه قابلیت فری اکسامین B برای استفاده به عنوان یک منبع آهن جایگزین در کشت بافت گیاه نخود (*Cicer arietinum* L.) بررسی شد. تأثیر این کلات آهن طبیعی بر شاخص‌های رشد، محتوای کلروفیل و سلامت گیاه در شرایط نرمال (مقادیر استاندارد آهن) و کمبود آهن بررسی و با یک کلات آهن شیمیایی (Fe-EDTA) مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

تهیه جنین رسیده

بذرهای نخود (*Cicer arietinum* L.) تیپ سفید یا کابلی با نام بیونج از موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور در مراغه تهیه شد. بذرهای رسیده با استفاده از اتانل ۷۰ درصد به مدت ۱ دقیقه، محلول سفید کننده تجاری ۵۰ درصد (حاوی ۵/۲۵ درصد هیپوکلرید سدیم) به مدت ۱۵ دقیقه (همراه با همزدن روی شیکر با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه) و به دنبال آن چهار بار آبشویی با آب مقطر استریل ضد عفونی سطحی شد. پس از ضد عفونی بذرهای یک شب در آب مقطر استریل قرار داده شد. سپس محور جنینی هر بذر در محیط استریل خارج شد.

محیط و شرایط کشت جنین رسیده

جنین‌های جدا شده بر روی محیط MS و MS ۱/۲ حاوی ۳ درصد سوکروز و ۰/۸ درصد آگار کشت شد. فری اکسامین B (*Desferal*, Novartis Pharmaceuticals Corporation) و یا Fe-EDTA (Sigma) با غلظت‌های متفاوت (مطابق جدول ۱) به عنوان منبع آهن به محیط کشت اضافه شد. اسیدیته (pH) تمام تیمارها پس از افزودن منبع آهن روی ۵/۸ تنظیم شد. محیط کشت آماده شده به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۲ اتمسفر ضد عفونی شد. هر تیمار دارای ۱۰ تکرار و هر تکرار حاوی یک شیشه مربا با ۴ جنین بود. این آزمایش دو بار تکرار شد. نمونه‌ها در فیتوترون در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس و ۱۶ ساعت نور/۸ ساعت تاریکی نگهداری شد. گیاهچه‌ها هر ۳ هفته به محیط تازه منتقل شد. پس از ۷ هفته، گیاهچه‌ها در شرایط استریل جمع‌آوری شد.

بررسی مورفولوژی گیاهچه

در سه تیمار آهن محیط MS شامل بدون آهن، Fe-EDTA و فری اکسامین B به ترتیب ۴۵، ۷۸ و ۹۵ درصد بود.

محتوای کلروفیل برگ

تحلیل واریانس نشان داد که افزودن آهن به محیط کشت تأثیر معنی داری ($p \leq 0.05$) بر محتوای کلروفیل برگ داشت. بر طبق نتایج حاصل کلروفیل a و b و محتوای کلروفیل کل در تیمارهای حاوی Fe-EDTA بیشتر از سایر تیمارها بود. اگر چه مقادیر

Fe-EDTA رشد طبیعی داشته و علایم زردی و یا نکروز در نوک ساقه آن‌ها مشاهده نشد (جدول ۲). استفاده از محیط کشت MS کامل موجب تشکیل طوقه‌های کلفت در مقایسه با محیط کشت MS ۱/۲ شد. طوقه‌های گیاهچه‌های کشت شده در MS ۱/۲ باریک و شاخه‌ها علفی شکل بود (شکل ۱). در هر سه تیمار آهن اعمال شده در محیط MS ۱/۲ تمامی جنین‌ها (۱۰۰ درصد) ریشه دار شد. در صورتی که درصد ریشه زایی جنین‌های رسیده

جدول ۱- تیمارهای مختلف آهن اضافه شده به محیط محیط کشت MS.

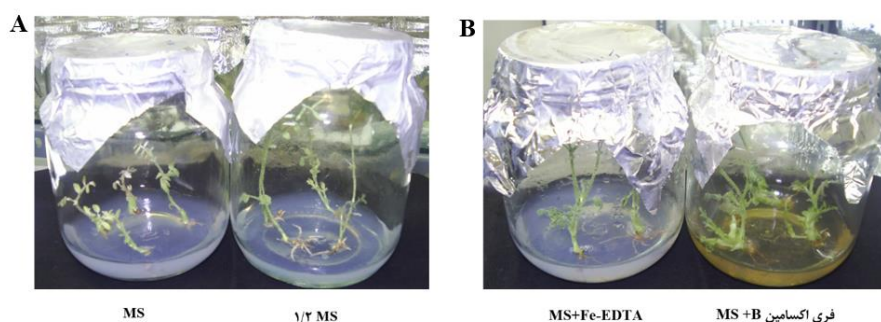
Table 1. Different iron treatments applied in MS medium.

تیمار آهن	محیط کشت
بدون آهن	MS
Fe- EDTA	
فری اکسامین B	
بدون آهن	۱/۲MS
۱/۲Fe- EDTA	
فری اکسامین B ۱/۲	

جدول ۲- مورفولوژی ساقه، درصد ریشه زایی، زردی و سرسوختگی نخود در تیمارهای مختلف آهن.

Table 2. Shoot morphology, rooting percentage, chlorosis and necrosis of chickpea in different iron treatments.

تیمارها و محیط کشت	فرم ساقه و طوقه	ریشه زایی درصد	زردی	سر سوختگی ساقه
MS (بدون آهن)	طوقه ضخیم و ساقه طبیعی	۴۵	+	+
MS+Fe- EDTA	طوقه ضخیم و ساقه طبیعی	۷۸	-	-
فری اکسامین B+ MS	طوقه ضخیم و ساقه طبیعی	۹۵	-	-
MS ۱/۲ (بدون آهن)	طوقه نازک و ساقه علفی	۱۰۰	+	+
۱/۲MS+ ۱/۲ Fe- EDTA	طوقه نازک و ساقه علفی	۱۰۰	-	-
فری اکسامین B ۱/۲+ ۱/۲MS	طوقه نازک و ساقه علفی	۱۰۰	-	-



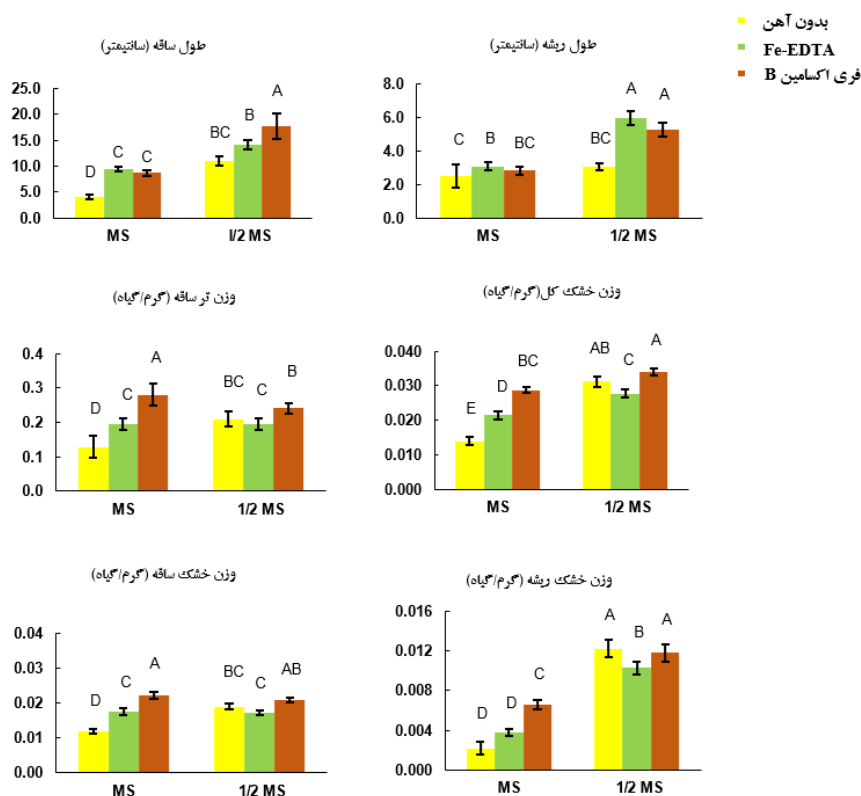
شکل ۱- تأثیر محیط کشت و تیمار آهن بر مورفولوژی گیاهچه نخود. A. تأثیر غلظت محیط کشت MS. B. تأثیر منبع آهن.

Fig. 1. Effect of different treatments of iron and culture media on chickpea seedling morphology. A. Effect of culture media concentration. B. Effect of iron source.

جدول ۳- محتوای کلروفیل (chl) نخود در تیمارهای مختلف آهن و محیط کشت.

Table 3. Chlorophyll content of chickpea in different treatments of iron and culture media.

Chl a/b	Chl a+b (mg/g)	Chl b (mg/g)	Chl a (mg/g)	تیمارها و محیط کشت
4.7 ± 0.41^a	32.3 ± 3.96^d	5.6 ± 0.52^d	26.6 ± 3.55^d	MS (بدون آهن)
3.6 ± 0.23^b	158.0 ± 13.38^{ab}	34.4 ± 2.95^a	123.7 ± 10.98^{ab}	MS+Fe- EDTA
4.0 ± 0.35^{ab}	90.8 ± 11.71^c	18.6 ± 3.42^{bc}	72.2 ± 8.74^c	MS+ B فری اکسامین
5.1 ± 1.12^{ab}	87.3 ± 7.19^c	17.5 ± 4.26^c	69.9 ± 3.09^c	1/2MS (بدون آهن)
4.1 ± 0.21^{ab}	173.6 ± 11.30^a	34.6 ± 3.19^a	139.1 ± 8.34^a	1/2MS+ 1/2 Fe- EDTA
4.3 ± 0.29^{ab}	142.5 ± 8.70^b	27.0 ± 1.88^{ab}	115.4 ± 7.41^b	1/2MS+ 1/2 B فری اکسامین



شکل ۲- تأثیر محیط کشت و تیمارهای آهن بر شاخص‌های رشد گیاهچه نخود.

Fig. 2. Influence of culture media and iron treatments on chickpea seedling growth parameters.

شاخص‌های رشد گیاه

کاهش غلظت نمک‌های MS به نصف، طول ساقه را از ۴ به ۱۱ سانتی‌متر افزایش داد. در تیمارهای مختلف آهن نیز این افزایش طول دیده شد. طول ساقه در محیط کشت 1/2MS همراه با فری اکسامین B، ۱۷/۷ سانتی‌متر و به‌طور معنی‌دار نسبت به بقیه تیمارها بیشتر بود. درحالی‌که تفاوت طول گیاهچه‌های کشت‌شده در محیط 1/2MS حاوی Fe-EDTA (۱۴/۱ سانتی‌متر) و بدون آهن (۱۱ سانتی‌متر) معنی‌دار نبود (شکل ۲). طول ریشه در محیط 1/2MS حاوی Fe-EDTA و فری اکسامین B به ترتیب ۵/۹۹ و ۵/۳۰ سانتی‌متر و بیشتر از سایر تیمارها بود. تفاوت طول ریشه در

کلروفیل a و b استخراج شده از برگ گیاهچه‌های کشت شده در محیط حاوی فری اکسامین B کمتر از گیاهچه‌های کشت شده در حضور Fe-EDTA بود اما نسبت کلروفیل a/b در این دو تیمار تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۳). در تیمارهای 1/2 MS با و بدون آهن مقادیر کلروفیل a و b و محتوای کلروفیل کل بیشتر از MS کامل بود. کاهش غلظت نمک‌های معدنی محیط کشت بدون آهن (iron free MS) به نصف (iron free 1/2MS) موجب افزایش محتوای کلروفیل کل به میزان ۱۶۰ درصد شد. افزایش منابع آهن Fe-EDTA و فری اکسامین B به این محیط به ترتیب موجب افزایش ۹ و ۵۷ درصدی محتوای کلروفیل کل شد.

نمونه‌های دو منبع مختلف آهن معنی‌دار نبود. اگرچه کاهش غلظت نمک‌های MS به تنهایی موجب افزایش طول ریشه نشد، منابع آهن Fe-EDTA و فری اکسامین B به ترتیب موجب افزایش ۱۳۸ و ۱۱۰ درصدی طول ریشه در ۱/۲MS شدند (شکل ۲). بیشترین وزن خشک گیاهچه‌ها در محیط ۱/۲MS بدون آهن و یا با منبع آهن فری اکسامین B و همچنین محیط MS حاوی فری اکسامین B و به ترتیب برابر با ۰/۰۳۱، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۲۹ گرم بود. تأثیر کاهش غلظت نمک‌های MS بر افزایش وزن خشک گیاهچه در هر سه تیمار آهن معنی‌دار بود. افزودن فری اکسامین B به محیط MS کامل به جای Fe-EDTA وزن خشک کل را ۳۸ درصد افزایش داد. این میزان افزایش در ۱/۲MS کمتر (۲۱ درصد) بود (شکل ۲). افزودن Fe-EDTA به MS کامل موجب افزایش وزن خشک ریشه نشد. در صورتیکه فری اکسامین B موجب افزایش ۲۵۰ درصدی وزن خشک ریشه شد. در محیط 1/2MS وزن خشک ریشه محیط بدون آهن و حاوی فری اکسامین B برابر و ۲۰ درصد بیشتر از محیط حاوی Fe-EDTA بود (شکل ۲). تأثیر غلظت نمک‌های MS و منابع آهن بر وزن خشک اندام‌های هوایی شامل ساقه و برگ‌ها کاملاً مشابه نتایج بدست آمده برای ریشه بود. منبع آهن بر وزن تر و خشک اندام‌های هوایی تأثیر معنی‌داری داشت. بیشترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به محیط 1/2MS و یا MS حاوی فری اکسامین B و به ترتیب برابر با ۰/۰۲۱ و ۰/۰۲۲ گرم بود. بیشترین وزن تر اندام هوایی مربوط به تیمار MS حاوی فری اکسامین B، برابر با ۰/۲۸۰ گرم و ۴۳ درصد بیشتر از MS حاوی Fe-EDTA بود (شکل ۲).

محققان نشان داد که استفاده از منبع آهن برای رشد نخود حیاتی است و با نقش فعالی که در جذب سایر ریز مغذی‌ها دارد رشد گیاه را توسعه می‌دهد (Abo-Rady, 1988). کشاورزان به طور معمول زردی ناشی از کمبود آهن را با استفاده از کلات‌های شیمیایی آهن پیشگیری و یا درمان می‌کنند (Lucena, 2003; Fernández & Ebert, 2005). در سال‌های اخیر، جهت کاهش مصرف کلات‌های شیمیایی آهن و افزایش آهن محلول و قابل استفاده توسط گیاه روش‌های مختلفی مانند استفاده از تکنولوژی کاهش اندازه ذرات آهن در مقیاس نانومتر (نانوتکنولوژی) همراه با حامل‌های مختلف مانند پلی اتیلن گلاکول (PEG) طراحی و مطالعه شده است (Duran et al., 2018). اگرچه مقدار مصرف مواد شیمیایی برای تهیه این نوع محصولات بسیار کمتر است اما در صورت عدم استفاده صحیح و به اندازه موجب تجمع ذرات آهن با ضریب نفوذ پذیری بالا در کلیه بافت‌های زیستی و بروز خطراتی برای محیط زیست و انسان می‌شوند (Wang et al., 2016). استفاده از کلات‌های طبیعی آهن به عنوان یک ناقل جهت انتقال آهن از خاک به ریشه‌های گیاه مطالعه و گزارش شده است (Lindsay, 1995; Lucen, 2003). پژوهشگران استفاده مستقیم و اختصاصی از فری اکسامین B را توسط خیار گزارش کرده‌اند (Wang et al., 1993). همچنین گزارش شده که جو دو سر در مقایسه با سایر سیدروفورهای هیدروکساماتی ترجیحاً فری اکسامین B را جذب می‌کند (Crowley et al., 1988). استفاده از این کلات طبیعی آهن توسط گیاهان زراعی مانند آفتاب گردان و سورگوم توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است (Cline et al., 1984). افزایش گره‌های ریشه نخود، تثبیت نیتروژن در هر گره و همچنین وزن خشک گیاه در تیمار با یک سویه باکتری رایزوبیومی که بر اثر جهش مقادیر بیشتری سیدروفور تولید می‌کرد در مقایسه با سویه والد گزارش شده است (Raychaudhuri et al., 2005). افزایش زیست توده (بیومس) گیاهی توسط فری اکسامین B گزارش شده است. همچنین استفاده ترجیحی از آن برای ساخت مجدد کلروفیل در آزمایش‌های مدت دار در مقایسه با کلات آهن شیمیایی Fe-EDTA نشان داده شده است (Wang et al., 1993). در این مطالعه برای اولین بار کاربرد مستقیم فری اکسامین B به عنوان منبع آهن برای گیاه زراعی نخود گزارش شده است. همچنین تأثیر معنی دار فری اکسامین بر وزن تر

نمونه‌های دو منبع مختلف آهن معنی‌دار نبود. اگرچه کاهش غلظت نمک‌های MS به تنهایی موجب افزایش طول ریشه نشد، منابع آهن Fe-EDTA و فری اکسامین B به ترتیب موجب افزایش ۱۳۸ و ۱۱۰ درصدی طول ریشه در ۱/۲MS شدند (شکل ۲). بیشترین وزن خشک گیاهچه‌ها در محیط ۱/۲MS بدون آهن و یا با منبع آهن فری اکسامین B و همچنین محیط MS حاوی فری اکسامین B و به ترتیب برابر با ۰/۰۳۱، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۲۹ گرم بود. تأثیر کاهش غلظت نمک‌های MS بر افزایش وزن خشک گیاهچه در هر سه تیمار آهن معنی‌دار بود. افزودن فری اکسامین B به محیط MS کامل به جای Fe-EDTA وزن خشک کل را ۳۸ درصد افزایش داد. این میزان افزایش در ۱/۲MS کمتر (۲۱ درصد) بود (شکل ۲). افزودن Fe-EDTA به MS کامل موجب افزایش وزن خشک ریشه نشد. در صورتیکه فری اکسامین B موجب افزایش ۲۵۰ درصدی وزن خشک ریشه شد. در محیط 1/2MS وزن خشک ریشه محیط بدون آهن و حاوی فری اکسامین B برابر و ۲۰ درصد بیشتر از محیط حاوی Fe-EDTA بود (شکل ۲). تأثیر غلظت نمک‌های MS و منابع آهن بر وزن خشک اندام‌های هوایی شامل ساقه و برگ‌ها کاملاً مشابه نتایج بدست آمده برای ریشه بود. منبع آهن بر وزن تر و خشک اندام‌های هوایی تأثیر معنی‌داری داشت. بیشترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به محیط 1/2MS و یا MS حاوی فری اکسامین B و به ترتیب برابر با ۰/۰۲۱ و ۰/۰۲۲ گرم بود. بیشترین وزن تر اندام هوایی مربوط به تیمار MS حاوی فری اکسامین B، برابر با ۰/۲۸۰ گرم و ۴۳ درصد بیشتر از MS حاوی Fe-EDTA بود (شکل ۲).

بحث

تأثیر کمبود آهن به علت نقش مهمی که در فعالیت آنزیم‌های مسئول بیوسنتز پیش سازهای کلروفیل وابسته به آهن دارد به صورت زردی برگ دیده می‌شود (Spiller et al., 1982; Tottey et al., 2003). چنانچه در زمان مناسب به گیاه تحت تنش آهن مورد نیاز نرسد زردی به نکرز (سوختگی) تبدیل شده و خزان زود هنگام اتفاق خواهد افتاد (Barton & Abadía, 2006). در این مطالعه نیز گیاهچه‌های حاصل از کشت جنین جدا شده از منبع غذایی ذخیره‌ای بذر در محیط بدون آهن ابتدا علائم زردی (۱۰ روز پس از کشت) و سپس (۳۰ روز پس از کشت) نکرز را نشان دادند. نتایج تحقیق حاضر همسو با گزارش‌های این

REFERENCES

- Abo-Rady, M.D.K.** 1988. Effect of iron deficiency on growth, micronutrient status and chlorophyll content of *vinca rosea* grown in calcareous soils. – *Arid. Land. Res. Manag.* 2: 275 -283.
- Arnon, D.I.** 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. – *Plant. Physiol.* 24: 1-150.
- Barton, L.L. and Abadía, J.** 2006. Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms. – Springer, Netherlands pp: 103-128.
- Bienfait, H.F., Garcia-Mina, J. and Zamareno, A.M.** 2004. Distribution and secondary effects of EDDHA in some vegetable species. – *J. Soil. Sci. Plant. Nut.* 50: 1103-1110.
- Bloemberg, G.V. and Lugtenberg, B.J.J.** 2001. Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. – *Curr. Opin. Plant. Biol.* 4: 343-350.
- Bricker, B.** 1991. MSTATC: A microcomputer program for the design, management and analysis of agronomic research experiments. – Crop and Science Department, MSU, East Lansing MI 48824, USA.
- Cline, G.R., Reid, C.P., Powell, P.E. and Szaniszlo, P.J.** 1984. Effects of a hydroxamate siderophore on iron absorption by sunflower and sorghum. – *Plant. Physiol.* 76: 36-39.
- Crowley, D.E., Patrick reid, C.P. and Szaniszlo, P.J.** 1988. Utilization of microbial siderophores in iron acquisition by oat. – *Plant Physiol.* 87: 680-685.
- Crowley, D.E., Wang, Y.C., Reid, C.P.P. and Szaniszlo, P.J.** 1991. Mechanisms of iron acquisition from siderophores by microorganisms and plants. – *Plant Soil* 130: 179-198.
- Duran, N.M., Medina-Llamas, M., Cassanji, J.G.B., de Lima, R.G., de Almeida, E., Macedo, W.R., Mattia, D. and Pereira de Carvalho, H.W.** 2018. Bean seedling growth enhancement using magnetite nanoparticles. – *J. Agr. Food. Chem.* 66: 5746-5755.
- Fernández, V. and Ebert, G.** 2005. Foliar iron fertilization—a critical review. – *J. Plant Nutr.* 28: 2113-2124.
- Guerinot, M.L. and Yi, Y.** 1994. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available. – *Plant Physiol.* 104: 815-820.
- Hashemimajd, K. and Jamaati-e-Somarin, S.** 2011. Investigating the effect of iron and zinc enriched vermicompost on growth and nutritional status of peach trees. – *Sci. Res. Essays.* 6: 5004-5007.
- Kraemer, S. M.** 2004. Iron oxide dissolution and solubility in the presence of siderophores. – *Aquat. Sci.* 66: 3-18.
- Lindsay, W.L.** 1995. Chemical reactions in soils that affect iron availability to plants. A quantitative approach, In J. Abadía (ed.), *Iron nutrition in soils and plants*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp: 7-14.
- Lucena, J.J.** 2003. Fe chelates for remediation of Fe chlorosis in strategy I plants. – *J. Plant. Nutr.* 26: 1969-1984.
- Mahrokh, A., Azizi, F., Sadeghi, A. and Karimi, A.** 2011. Effect of application of *Streptomyces bacterium* on و خشک گیاهچه نخود بویژه زمانی که نمونه‌ها با تنش کمبود عناصر غذایی ماکرو و میکرو (1/2 MS) مواجه بودند نشان داده شد. این نتایج کارآیی بیشتر فری اکسامین را در مقایسه با Fe-EDTA برای افزایش توانایی گیاه در جذب مواد غذایی بیان می‌کند. بر اساس نتایج این مطالعه تامین آهن مورد نیاز از طریق فری اکسامین B همراه با کاهش مواد مغذی تا ۱/۲، حجم ریشه را بدون تغییر در وزن اندام‌های فتوستتر کننده افزایش داد. این یافته زمانی اهمیت دارد که گسترش ریشه گیاهچه برای استقرار در خاک در شرایط کمبود آب (تنش خشکی) ضروری است. تنظیم آهن درون سلولی بر تحمل استرس اکسیداتیو موثر است و می‌تواند پاسخ‌های گیاه به تنش‌های زیستی را تحت تأثیر قرار دهد. سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی سلولی همراه با تنظیم دقیق مقادیر آهن سلولی می‌تواند تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن را که در تنش‌های غیر زیستی مانند خشکی افزایش پیدا می‌کنند کاهش دهد (Parveen et al., 2016). استفاده از فری اکسامین B به عنوان کود آهن ممکن است در تنش خشکی و یا کمبود مواد غذایی ناخواسته و یا با هدف کاهش استفاده از کودهای شیمیایی نسبت به کلات‌های آهن شیمیایی مانند Fe-EDTA یک مزیت باشد. استفاده از استرپتومایسس‌های محرک رشد تولید کننده سیدروفور در افزایش رشد چغندر قند (Sadeghi et al., 2009)، گندم تحت تنش شوری (Sadeghi et al., 2012) و ذرت در شرایط تنش کم آبی (Mahrokh et al., 2011) گزارش شده است. طراحی پژوهش‌های جدید برای توسعه استخراج فری اکسامین B از این باکتری‌ها و یا استفاده مستقیم از آن‌ها جهت افزایش رشد و تخفیف اثرات منفی تنش خشکی گیاهان زراعی به ویژه نخود از برنامه‌های آینده نویسندگان این مقاله است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، جهت تامین اعتبار مالی این پژوهش قدردانی می‌شود.

- on grain yield and its components of maize cv. KSC260 under drought stress conditions. – Seed. Plant. Prod. J. 27: 165-181.
- Mawji, E., Gledhill, M., Milton, J.A., Tarran, G.A., Ussher, S., Thompson, A., Wolff, G.A., Worsfold, P.J. and Achterberg, E.P. 2008. Hydroxamate siderophores: Occurrence and importance in the Atlantic Ocean. – Environ. Sci. Technol. 42: 8675-8680.
- Mobarra, N., Shanaki, M., Ehteram, H., Nasiri, H., Sahmani, M., Saeidi, M., Goudarzi, M., Pourkarim, H. and Azad, M. 2016. A Review on iron chelators in treatment of iron overload syndromes. – Int. J. Hematol. Oncol. Stem. Cell. Res. 10: 239-247.
- Muller, G. and Roymond, K.N. 1984. Specificity and mechanism of Ferrioxamine mediated iron transport in *Streptomyces pilosus*. – J. Bacteriol. 160: 304-312.
- Neilands, J.B. 1981. Microbial iron compounds. – Annu. Rev. Biochem. 50: 715-731.
- Parveen, S., Gupta, D.B., Dass, S., Kumar, A., Pandey, A., Chakraborty, S. and Chakraborty, N. 2016. Chickpea ferritin cafer1 participates in oxidative stress response, and promotes growth and development. – Sci. Rep. 6: 312-18.
- Powell, P.E., Cline, E.R., Reid, C.P.P. and Szaniszlo, P.J. 1980. Occurrence of hydroxamate siderophore iron chelators in soils. – Nature 287: 833-834.
- Raychaudhuri, N., Das, S.K. and Chakraborty, P.K. 2005. Symbiotic effectiveness of a siderophore overproducing mutant of *Mesorhizobium cicero*. – Pol. J. Microbiol. 54: 37-41.
- Romheld, V., and Marschner, H. 1986. Mobilization of iron in the rhizosphere of different plant species. – Adv. Plant. Nutr. 2: 155-204.
- Sadeghi, A., Karimi, E., Dahaji, P.A., Javid, M.G., Dalvand, Y. and Askari, H. 2012. Plant growth promoting activity of an auxin and siderophore producing isolate of *Streptomyces* under saline soil conditions. – World. J. Microbiol. Biotechnol. 28: 1503-1509.
- Sadeghi, A., Hesani, A.R., Askari, H., Naderi Qomi, D., Farsi, M. and Majidi Hervan, E. 2009. Biocontrol of *Rhizoctonia solani* damping off of sugar beet with native *Streptomyces* strains under field conditions. – Biocontrol. Sci. Technol. 19: 985-991.
- Spiller, S., Castlefranco, A. and Castlefranco, P. 1982. Effects of iron and oxygen on chlorophyll biosynthesis. In vivo observations on iron and oxygen-deficient plants. – Plant. Physiol. 69: 107-111.
- Tottey, S., Block, M., Allen, M., Westergren, T., Albrieux, C., Scheller, H., Merchant, S. and Jensen, P. 2003. Arabidopsis CHL27, located in both envelope and thylakoid membranes, is required for the synthesis of protochlorophyllide. – Proc. Natl. Acad. Sci. 100: 16119-16124.
- Wang, Y., Brown, H.N., Crowley, D.E. and Szaniszlo, P.J. 1993. Evidence for direct utilization of a Siderophore, Ferrioxamine B in axenically grown cucumber. – Plant. Cell Environ. 16: 579-585.
- Wang, Y., Deng, L., Caballero-Guzman, A. and Nowack, B. 2016. Are engineered nano iron oxide particles safe? an environmental risk assessment by probabilistic exposure, effects and risk modeling. – Nanotoxicol. 10: 1545-1554.

How to cite this article:

Khosravi, S., Koobaz, P., Naderi, D., Mojtahedi, N. and Sadeghi, A. 2019. *In vitro* studies on effects of Ferrioxamine B on chickpea (*Cicer arietinum* L.) growth and chlorophyll content – Nova Biol. Reperta 6: 116-123.

خسروی، س.، کوپاز، پ.، نادری، د.، مجتهدی، ن. و صادقی، ا. ۱۳۹۸. بررسی تأثیر فری اکسامین B بر رشد و محتوای کلروفیل نخود در مطالعه در شیشه. – یافته‌های نوین در علوم زیستی ۶: ۱۲۳-۱۱۶.