مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۳، ص. ۸۹-۹۷

Original Article

استفاده از روش گیاه‌پالایی در پالایش سزیم پایدار از محلول‌ها

مهدی برقعی (استاد)
مرکز تحقیقات مهندسی بیوشیمی، دانشگاه صنعتی شریف
رکسانا موگوئی* (استادیار)
گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
رضا ارجمندی (استادیار)
گروه مدیریت محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
منوچهر وثوقی (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف
گلناز تجدد (استادیار)
گروه زیست‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

در این نوشتار، کارایی *Chenopodium album* برای گیاه‌پالایی محلول‌های آلوده به سزیم مطالعه شده است. گیاهان در شرایط کنترل‌شده به‌صورت هایدروپونیک رشد و سپس در معرض جذب سزیم از محلول‌های سزیم کلراید قرار گرفتند که حاوی ۰/۲۷، ۱/۵۸ و ۳/۹۵ گرم یون سزیم بود. در پایان ۱۴ روز، غلظت سزیم باقیمانده در محلول به‌ترتیب ۰/۰۱±۰/۱۵، ۰/۰۵±۰/۹۵ و ۰/۲۹±۱/۸۵ میلی‌گرم بر لیتر بود که نشان داد ۲/۱۲±۶۸/۰۸٪، ۳/۲۸±۳۹/۶۶٪ و ۷/۵۷±۵۲/۹۹٪ سزیم محلول‌ها مورد پالایش قرار گرفته است. آنالیزهای گیاهی نشان داد که به‌ترتیب، ۶/۳۳±۳۹۶/۱۶، ۴۵/۶۵±۵۲۱/۴ و ۹۳/۰۷±۱۲۵۶/۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم سزیم در گیاهان تجمع یافته است. همچنین مشاهدات میکروسکوپی اندام‌های هوایی نشان داد که ساختمان بافتی این اندام‌ها هیچ تغییری نکرده است و با افزایش غلظت سزیم، تراکم آوندهای چوبی و بلورها بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی افزایش جذب سزیم و پاسخ گیاه به اثرات سمی آن است.

mborghei@sharif.edu
r_moogoui@iau-tnb.ac.ir
rezaarjmandi@yahoo.com
vosoughi@sharif.edu
gtajadod@yahoo.com

واژگان کلیدی: *Chenopodium album*، سزیم، گیاه‌پالایی، هایدروپونیک.

۱. مقدمه

از مهم‌ترین نگرش‌ها به فنّاوری زیستی، لحاظ کردن آن به‌منزله‌ی ابزاری برای رفع آلودگی‌های زیست‌محیطی است. در سال‌های اخیر، گیاه‌پالایی به‌منزله‌ی روشی با کیفیت مطلوب و سازگار با محیط زیست مورد توجه بوده است.[۱-۴] گیاه‌پالایی، استفاده از گیاهان برای جداسازی کلی یا بخشی از آلاینده‌ها از خاک، لجن، رسوبات، آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و پساب است. همچنین امکان پالایش فلزات سنگین از قبیل کادمیوم، کروم، و عناصر رادیواکتیو از قبیل سزیم، استرانسیوم و اورانیوم و انواع آلودگی‌های آلی از قبیل آلودگی‌های نفتی از طریق گیاهان بررسی شده است.[۲و۵-۸] عمده‌ترین رادیونوکلوئید مصنوعی ناشی از شکافت هسته‌یی اورانیوم، رادیوایزوتوپ سزیم ۱۳۷ است. این عنصر می‌تواند در طول زنجیره‌ی غذایی حرکت و وارد بدن انسان‌ها شود.[۹] پالایش مؤثر رادیونوکلئیدهایی از قبیل سزیم ۱۳۷ از خاک‌ها و محلول‌های آلوده، به‌ویژه پالایش در محل، برای کاهش ریسک آلودگی انسان و محیط زیست ضروری است. لازم به ذکر است که حرکت سزیم پایدار در اکوسیستم به‌منزله‌ی شاخصی از حرکت سزیم ۱۳۴ و سزیم ۱۳۷ مطرح است.[۱۰و۱۱] سزیم پایدار در صخره‌های رسوبی و خاک تا غلظتی معادل ۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وجود دارد،[۱۲و۱۳] و در محلول‌های کشت با غلظت بیش از ۲۰۰ میکرومول برای گیاهان سمی است.[۱۴] توجه به توزیع سزیم در گیاه، لایه‌های بالایی خاک و حرکت این فلز در اکوسیستم به دهه‌ی ۱۹۵۰ باز می‌گردد،[۱۵و۱۶] و با توسعه‌ی فناوری‌های هسته‌یی مورداستفاده در تولید انرژی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.[۱۷-۲۰] عنصر سزیم در گیاهان نقش غذایی مشخصی ندارد، اما مکانیسم انتقال آن شبیه پتاسیم است. گیاهان در مکانیسم جذب، تمایزی میان ریزمغذی‌ها و یون‌های فلزی قائل نیستند. برخی از انتقال‌دهنده‌های مواد غذایی، فلزات شامل گروه‌های: الف) انتقال‌دهنده‌های غشای پلاسمایی درگیر در عملیات جذب، ب) انتقال‌دهنده‌های تونوپلاستی برای جذب، ج) حرکت مجدد از محل واکوئل‌ها، د) انتقال‌دهنده‌ها از آوندهای آب‌کش، ح) انتقال‌دهنده‌های درون غشای پلاسمایی‌اند. هدف این پژوهش مقایسه‌ی مراحل جوانه‌زنی دوگونه علف هرز *Chenopodium album* و

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۸۹/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۰/۵/۱۷.

Archive of SID
www.SID.ir

Chenopodium scoporia برای استقرار در سیستم کشت هایدروپونیک است. نحوه‌ی رویش گیاهان تا رسیدن به‌مرحله‌ی مناسب عملیات پالایش از اهداف دیگر آن است. کارایی پالایش سزیم از محلول‌ها، میزان تجمع سزیم درگیاهان و اثر آن در ساختار تشریحی گیاه نیز در این پژوهش بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

ابتدا با جمع‌آوری اطلاعات مربوط به گیاه‌پالایی، غربال‌گری گیاهان انجام و امکان تهیه‌ی بذرگونه‌های گیاهی که توان جذب این عنصر و توان انتقال آن به بخش‌های هوایی گیاه را دارند، بررسی شد. انتخاب گونه‌های گیاهی که در محدوده‌ی وسیع جغرافیایی درکشور رویش داشته و سریع‌الرشد باشند، اهمیت ویژه‌یی دارد. بنابراین، گونه‌هایی از خانواده‌ی Chenopodiaceae، *Chenopodium album* و *Chenopodium scoporia* مورد آزمایش قرار گرفتند. در دو آزمایش هم‌زمان در دمای ۱۳ درجه به‌مدت ۴۸ ساعت این دو بذر در فضای تاریک در آب به‌صورت محلول قرار گرفتند. پس از ۴۸ ساعت، آثار جوانه‌زنی در هر دو بذر مشاهده شد. با این تفاوت که جوانه‌های اسکوپوریا بزرگ‌تر و به اندازه‌ی حدود یک میلی‌متر مشاهده شد، اما در گیاه آلبوم فقط آثار بسیار ریز سفید ظاهر شد. در این مرحله بذرها در شن قرار گرفتند و همچنان فضای رشد بذرها تاریک نگاه داشته می‌شد. پس از گذشت یک هفته تا ده روز به‌تدریج جوانه‌های آلبوم تبدیل به گیاهچه شدند اما جوانه‌های اسکوپوریا خشک شد (شکل ۱). لازم به یادآوری است که این‌گونه گیاه قادر به سازگاری و رویش در مناطق وسیعی از کشور است که دامنه‌ی کاربری آن را بسیار گسترده می‌سازد. گیاهان پس از مرحله‌ی جوانه‌زنی به مدت یک ماه در شن رشد کردند و آماده‌ی انتقال به گلخانه‌ی هایدروپونیک هستند.

۱.۲. سیستم‌های کشت هایدروپونیک

کشت هایدروپونیک: به‌طورکلی کشت بدون خاک از دو سیستم پیروی می‌کند:

۱. سیستم باز: محلول غذایی دوباره استفاده نمی‌شود، مانند: کشت در پشم سنگ، کشت کیسه‌یی و کشت در سنگ‌ریزه.

۲. سیستم بسته: محلول غذایی دوباره استفاده می‌شود و به‌عبارت‌دیگر محلول در یک چرخه قرار می‌گیرد که به آن فقط آب و مواد غذایی کاهش‌یافته افزوده می‌شود.

در استقرار سیستم هایدروپونیک باز، بستر مایع با ظروف ۱۰ لیتری استفاده شده است. لازم است بدنه‌ی این ظروف تیره باشد که ریشه‌های گیاهان نور دریافت نکنند. صفحات پوششی این ظروف از دو بخش تشکیل شده است. صفحاتی از جنس یونولیت به قطر ۲۰ میلی‌متر و به ابعاد (۳۷۰×۳۳۰) میلی‌متر که حاوی سوراخ‌هایی به قطر ۳۰ میلی‌متر است و در هر صفحه مجموعاً ۱۲ سوراخ وجود دارد. بخش دوم توری پلاستیکی که قطر سوراخ‌های آن به اندازه‌ی بذرهای کشت‌شده بستگی دارد. طرح اولیه‌ی ظروف در شکل ۱ نمایش داده شده است. گیاهان به‌مدت ۶۰ روز در این سیستم (آبیاری با هوگلند) پرورش داده می‌شوند و یک دوره‌ی رویش را سپری می‌کنند. هوادهی با الکتروپمپ با لوله‌هایی به قطر ۴ میلی‌متر که در درون هر یک از ظروف قرار می‌گیرد، انجام می‌شود (شکل ۱). هوادهی ۲۴ ساعته در افزایش رشد گیاهان مؤثر است. کمینه‌ی هوادهی ۵ تا ۶ حباب در ثانیه است. کنترل شرایط کشت در سیستم باز هایدروپونیک بستر جامد راحت‌تر است و سیستم را کاربردی‌تر می‌کند. در این روش گیاهچه‌ها در بستر شن و ماسه قرار می‌گیرند و با محلول غذایی هوگلند آبیاری می‌شوند. در طول ۹۰ روز، یک دوره‌ی رویش کامل را طی می‌کنند که شامل ۳۰ روز آبیاری با آب و ۶۰ روز آبیاری با محلول هوگلند است. در ساخت محلول هوگلند محلول عناصر ماکرو، جداگانه با غلظت‌های مندرج در جدول ۱ تهیه می‌شوند. عناصر میکرو به‌صورت یک محلول تهیه می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر هر یک از مواد مندرج در ستون عناصر غذایی میکرو در وزن‌های مندرج در جدول ۱ و به حجم ۲۴۰ میلی‌لیتر می‌رسند و استاک عناصر میکرو تهیه می‌شود. در مرحله‌ی بعدی، محلول‌های مربوط به عناصر ماکرو جداگانه تهیه، همراه محلول عناصر میکرو در مخزن اصلی به حجم ۲۴۰ لیتر می‌رسند. pH محلول نهایی بین ۵٫۵ تا ۵٫۸ تنظیم می‌شود. در صورت قرارنداشتن pH در محدوده‌ی مذکور، از اسیدهایی از قبیل CH_3COOH یا HNO_3 و محلول‌های قلیایی از قبیل KOH برای تنظیم pH استفاده می‌شود. اندازه‌گیری pH محلول چند مرتبه در روز ضروری است و از عوامل بسیار مهم محدودکننده‌ی رشد گیاه به‌شمار می‌رود.

جدول ۱. غلظت عناصر ماکرو و میکرو در ۲۴۰ لیتر هوگلند (پروتکل هوگلند ۱۹۵۰).

عناصر غذایی ماکرو	g/۱L	میلی‌لیتر استاک در ۲۴۰ لیتر محلول
$NH_4H_2PO_4$	۲۷٫۶	۲۴۰
KNO_3	۱۵۴٫۰۸	۱۴۴۰
$Ca(NO_3)_2,4H_2O$	۲۲۶٫۵۶	۹۶۰
$MgSO_4,7H_2O$	۱۱۸٫۰۸	۴۸۰
Fe-EDTA	۱٫۸	۳۶۰
عناصر غذایی میکرو	**g/۱L**	**میلی‌لیتر استاک در ۲۴۰ لیتر محلول**
H_3BO_3	۰٫۹	۲۴۰
$ZnSO_4,7H_2O$	۰٫۵۲	
$MnSO_4,4H_2O$	۲٫۴	
$CuSO4.5H_2O$	۰٫۱۹	
$(NH_4)_6MO_7.O_{24},4H_2O$	۰٫۰۴۸	

۲.۲. آزمایش‌های مربوط به پالایش سزیم از محلول

در این بخش، گیاهان ابتدا از سیستم هایدروپونیک خارج و با آب مقطر شسته شدند. سپس به‌مدت ۱۴ روز در معرض جذب سزیم از محلول سزیم‌کلراید با سه غلظت ۰٫۶، ۲ و ۵ میلی‌گرم بر لیتر با pH برابر ۶ قرار گرفتند (شکل ۱). در طول دوره‌ی پالایش، بیشینه‌ی دمای روزانه از ۳۶ تا ۴۲ درجه‌ی سانتی‌گراد و کمینه‌ی دمای روزانه از ۱۹ تا ۲۸ درجه‌ی سانتی‌گراد ثبت شده است. غلظت سزیم در پساب پس از اتمام مراحل جذب، اندازه‌گیری و درصدهای پالایش سزیم معین شد. گیاهان *Chenopodium album* در محلول سزیم‌کلراید در دو هفته مقاومت نشان داده و زنده مانده‌اند. در تیمارهای شاهد، گیاهان در آب قرار گرفتند.

۳.۲. آزمایش‌های مربوط به تجمع سزیم در بافت گیاهان

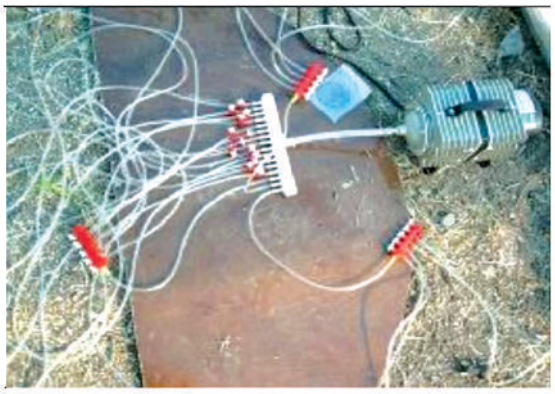
در پایان هر آزمایش، گیاهان از محلول سزیم‌کلراید خارج و کاملاً با آب مقطر شسته و در اجاق برقی با ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. بافت‌های خشک گیاه در HNO_3:$HClO_4$ (۵:۱, V:V) هضم و غلظت سزیم با دستگاه جذب اتمی تعیین شد.

Archive of SID

www.SID.ir

الف) بذر *Chenopodium scoporia*؛

ب) بذر *Chenopodium album*.



ج) هوادهی سیستم هایدروپونیک بستر مایع؛

د) اجزای سیستم هایدروپونیک بستر مایع؛

ه) جذب سزیم توسط *Chenopodium album*؛

و) کشت هایدروپونیک بستر جامد(بستر شن و ماسه).

شکل ۱. رشد هایدروپونیک و پالایش سزیم از محلول سزیم کلراید.

۴.۲. بررسی بافت‌های *Chenopodium album*

اندام‌های هوایی گیاه شامل ساقه، دم‌برگ و برگ پس ازجداسازی در محلول اکل و گلیسیرین به نسبت مساوی برای فیکساسیون[1] قرار گرفتند. پس از یک هفته برش دستی تهیه و از طریق رنگ‌آمیزی مضاعف (کارمن زاجی و آبی‌متیل به نسبت ۱ به ۱۰) رنگ‌آمیزی و نمونه‌ها مورد مطالعه و عکس‌برداری قرار گرفتند.

۵.۲. آنالیز آماری

هر آزمایش با سه تکرار انجام شد. در تأیید ارزش داده‌ها، تحلیل واریانس با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام و معنی‌داربودن اختلاف داده‌ها بررسی شد.

۳. نتایج

۱.۳. تعیین درصد جذب و کارایی

تعیین درصد جذب و کارایی در جدول ۲ محاسبه شده است که در آن، غلظت‌های اولیه‌ی و غلظت‌های نهایی محلول سزیم پس از سپری‌شدن دوره‌ی پالایش و درصد پالایش مورد محاسبه قرارگرفته‌اند. در این پژوهش کمینه‌ی دما در طول دوره‌ی رشد بین ۲۱ تا ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است و همچنین بین تغییرات دما و pH آب ضریب تشابه وجود دارد،[21] و تغییرات دمای محیط، دمای آب را تغییر می‌دهد که منجر به تغییر pH می‌شود و جذب بهینه‌ی مواد غذایی را از محلول هوگلند کاهش می‌دهد. کنترل pH در این آزمایش اهمیت ویژه‌یی دارد.

www.SID.ir

جدول ۲. غلظت و درصد جذب سرب در گیاه و محلول‌های مختلف (داده‌ها و میانگین سه تکرار) و اختلاف داده‌ها (در سطح* معنی‌دار $p < ۰/۰۵$).

گیاه	غلظت اولیه در محلول mgl^{-1}	غلظت نهایی در محلول mgl^{-1}	غلظت در گیاه $mgkg^{-1}$	درصد پالایش (٪)*
C. album	۰۰/۰۰	۰۰/۰۰	۰۰/۰۰	۰۰/۰۰
C. album	۰/۴۷	۰/۱۵±۰/۰۱	۳۹۶/۱۶±۶/۳۳	۶۸/۰۸±۲/۱۲
C. album	۱/۵۸	۰/۹۵±۰/۰۵	۵۲۱/۴±۴۵/۶۵	۳۹/۶۶±۳/۴۸
C. album	۳/۹۵	۱/۸۵±۰/۲۹	۱۲۵۶/۶۶±۹۳/۰۷	۵۲/۹۹±۷/۵۷

۲.۳. نتایج بافت‌شناسی شاهد

۱.۲.۳. ساختار نخستین ساقه

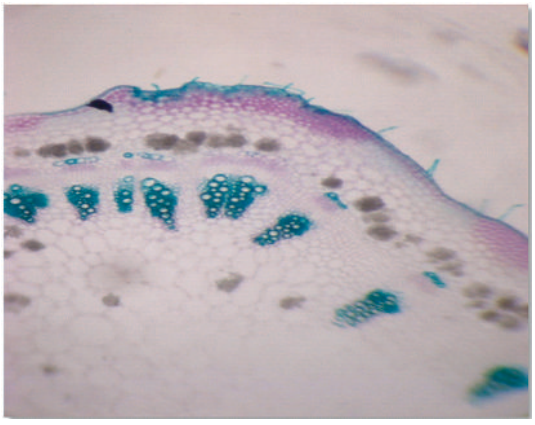
براساس مطالعات انجام‌شده در *Chenopodium album*، ساقه با یک لایه‌ی اپیدرم کوتیکولی پوشیده شده است. هیپودرم شامل چندین ردیف از سلول‌های کلانشیم است. کلانشیم منقطع و شامل ۸ تا ۱۰ توده است. فاصله‌ی ناحیه‌ی پوست و بافت پارانشیم با آندودرم مشخص و دارای بافت اسکلرانشیم به‌صورت پراکنده‌اند. سلول‌های بافت پارانشیم به‌صورت پراکنده دارای بلورهای اگزالات از نوع ماکله‌اند. دستجات آوندی در یک حلقه در مغز مرتب شده‌اند. در هر دسته‌ی آوندی از خارج به داخل منطقه‌ی آبکش، ناحیه‌ی پروکامبیومی و منطقه‌ی آوند چوب مشخص است (شکل ۲). کامبیوم فعالیتش محدود و نتیجه‌اش تشکیل حلقه‌های کامبیومی است که مسئول تشکیل بافت آوندی ثانویه است.

۲.۲.۳. ساختار پسین ساقه‌ی شاهد

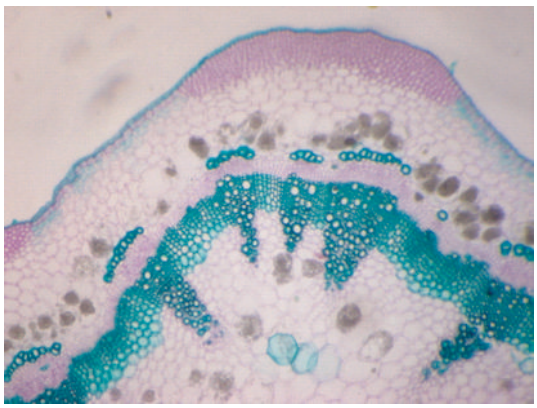
مطالعه بر روی رشد پسین *Chenopodium album* نشان داد که در این زمان تعداد لانه‌ی بافت کلانشیم در زیر اپیدرم افزایش یافته و بر تعداد فیبرهای قرارگرفته در روی آوندهای آبکش هم افزوده شده است (شکل ۳). کامبیوم‌های بین آوندی به هم ملحق می‌شوند و تشکیل یک حلقه‌ی کامبیومی با دستجات آوندی اولیه را می‌دهند. این حلقه به‌طور غیرطبیعی بندهای فیبری را در ناحیه‌ی کامبیوم بین‌آوندی قطع می‌کند و با تشکیل بافت پسین تعداد بلورهای ماکله افزایش می‌یابد (شکل ۴).

۳.۲.۳. ساختمان برگ شاهد

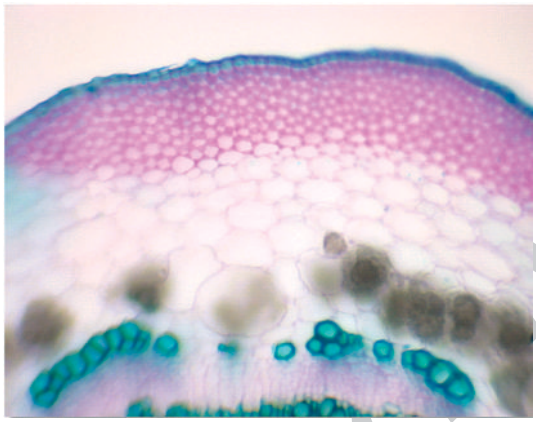
برگ‌ها دارای اپیدرم کشیده و باریک، کرک‌ها چندسلولی، غیرمنشعب و حبابی؛ مزوفیل‌ها نیز دارای دو ردیف پارانشیم نردبانی و چند ردیف پارانشیم اسفنجی‌اند. بلورهای ماکله داخل سلول‌های پارانشیم اسفنجی دیده می‌شوند (شکل ۵). همچنین روزنه‌ها تیپ آنموسیتیک دارند (شکل ۶).



شکل ۲. ساختار نخستین ساقه‌ی *Chenopodium album* (شاهد- ۱۰×).



شکل ۳. ساختار پسین ساقه (شاهد- ۱۵×).



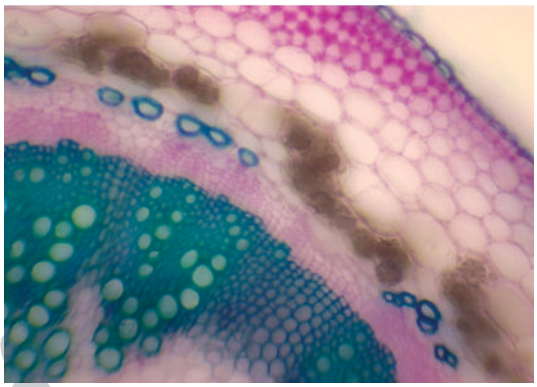
شکل ۴. افزایش تعداد بلورها با تشکیل بافت پسین (۴۰×).

شکل ۵. برگ (شاهد (۲۰×).

Archive of SID

www.SID.ir

شکل ۶. روزنه‌ی تیپ آنموسیتیک (۴۰×).



شکل ۷. افزایش رنگ‌پذیری بافت ساقه، تیمار با سزیم کلراید $2mgl^{-1}$ (۲۰×).

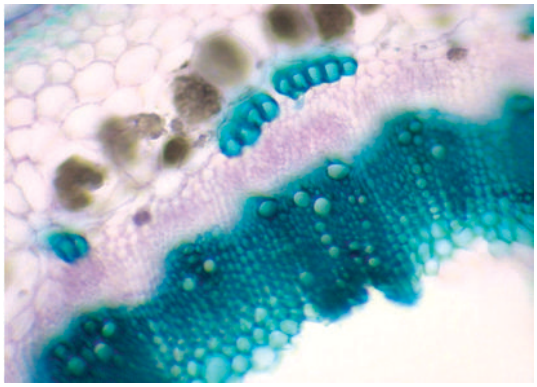
۴.۲.۳. تغییرات ساختمان تشریحی اندام‌های هوایی بعد از جذب سزیم

با مقایسه‌ی اندام‌های هوایی گیاهان تحت تیمار با گیاهان شاهد هم‌سن مشخص شد که با جذب سزیم درگیاه و انباشته‌شدن آن در اندام‌های هوایی (ساقه و برگ)، تغییراتی در این اندام‌ها صورت می‌گیرد که با افزایش غلظت سزیم این تغییرات شدیدترند. تغییرات قابل‌مشاهده بر اثر جذب و انباشت سزیم را می‌توان به سه دسته‌ی عمده تقسیم‌بندی کرد:

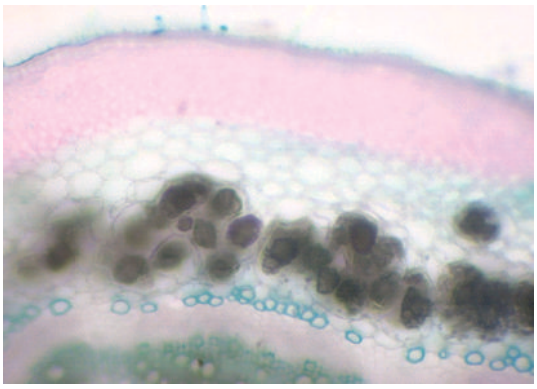
- افزایش میزان رنگ‌پذیری عناصر چوب در ساقه (شکل ۷)،
- افزایش تعداد بلورها در پارانشیم ساقه و افزایش رنگ‌پذیری آن‌ها (شکل ۸ و ۹)،
- افزایش تراکم دستجات آوند چوب و کاهش قطر آن‌ها در ساقه (شکل ۸ و ۹)،
- کاهش پارانشیم پوستی درگیاهان تحت تیمار (شکل ۸ و ۹)،
- افزایش تراکم بلورها و رنگ‌پذیری آن‌ها در پارانشیم برگ (شکل ۱۰ و ۱۱).

۴. بحث و تحلیل

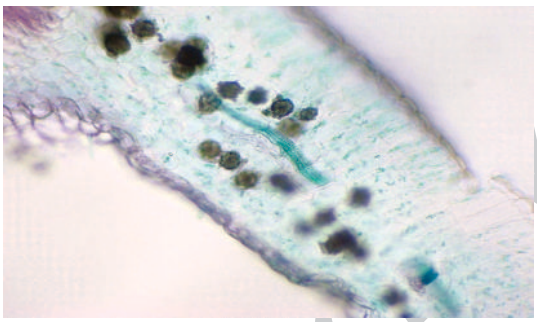
گیاه‌پالایی روش مؤثری در پالایش محلول‌های رادیواکتیو با سطح اکتیویته‌ی پایین به‌شمار می‌رود. در خاک‌های آلوده نیز گیاهان قادر به جداسازی سزیم از محیط هستند. آنچه در این مطالعات اهمیت دارد، رشد گیاهان در سیستم هایدروپونیک تا زمان موردنظر و حد بردباری این گیاهان در تحمل محیط‌های آلوده است.[۲۲] از سوی دیگر تفاوت آشکاری در میان گونه‌های گیاهی از نظر حد بردباری، تجمع و جذب فلزات وجود دارد. بنابراین در مرحله‌ی اول مطالعات گیاه‌پالایی، غربال‌گری نوع گونه‌های گیاهی اهمیت ویژه‌یی دارد. در غربال‌گری گونه‌های گیاهی برای جذب



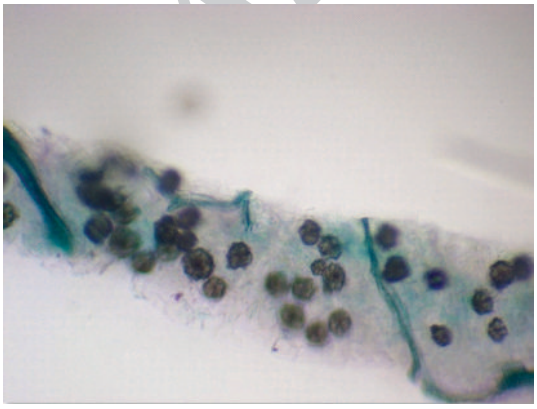
شکل ۸. افزایش تراکم بافت آوندی ساقه ـ تیمار با سزیم کلراید $5mgl^{-1}$ (۲۰×).



شکل ۹. افزایش تعداد بلورها در ساقه ـ تیمار با سزیم کلراید $5mgl^{-1}$ (۴۰×).



شکل ۱۰. افزایش تراکم بلورها و رنگ‌پذیری در بافت برگ، تیمار با سزیم کلراید $2mgl^{-1}$ (۲۰×).



شکل ۱۱. افزایش تراکم بلورها و رنگ‌پذیری در بافت برگ، برگ تیمار با سزیم کلراید $5mgl^{-1}$ (۲۰×).

www.SID.ir

آلاینده‌ها، قدرت و تحمل گونه‌ی گیاهی موردنظر، انعطاف‌پذیری در طول چرخه‌ی حیات و ویژگی‌های گیاهی، توزیع و جغرافیای زیستی گونه‌ی موردنظر، اندازه‌ی بذرها، امکان تکثیر، مسیرهای فتوسنتز ویژگی‌های انحصاری برخی گیاهان به‌منزله‌ی معیارهای اصلی غربال‌گری گیاهان برای پالایش فلزات استفاده می‌شود. روش‌های مهندسی کشت سوسپانسیون گیاهی نیز برای انتخاب سریع گونه‌ی گیاهی مناسب جداکننده‌ی آلودگی‌ها در غربال‌گری گیاهان اهمیت دارد. گیاهان متعلق به خانواده‌ی کنوپودیاسه، آمارانتاسه و آستراسه پالاینده‌های مؤثری برای عناصر رادیواکتیو به‌شمار می‌روند. گیاهان خانواده‌ی آستراسه پالاینده‌های خوبی برای محلول‌ها هستند. گیاهان متعلق به این خانواده همچنین پالاینده‌های مناسبی برای سزیم ۱۳۴ هستند.[۳] در این پژوهش چون هدف جداسازی فلزات از محلول‌ها و پساب است، لازم است گیاهان قادر به رشد در شرایط هایدروپونیک باشند. در دو گونه‌ی متعلق به خانواده‌ی Chenopodiaceae، *Chenopodium scoporia* به‌دلیل عدم توانایی جوانه‌زنی در خارج از ژرمیناتور یا گلخانه، گونه‌ی مناسبی نبودند؛ در حالی‌که *Chenopodium album* در شن و در فضای باز به‌صورت کاملاً متراکم رویش یافت که کاربری روش گیاه‌پالایی را در پالایش محلول‌ها در نقاط مختلف کشور ساده‌تر می‌کند. همین گیاه در سیستم هایدروپونیک بستر مایع قادر به ادامه‌ی رشد نبود. در سیستم رشد هایدروپونیک گیاهان، رعایت توازن یون‌ها درساخت هوگلند مهم است. در آزمایشی که بر روی رشد هایدروپونیک گیاه Calendula alata انجام شده است، کمبود ۱/۶ گرم Fe-EDTA در ۲۴۰ لیتر محلول هوگلند باعث

الف) کلروزیس برگ گیاه براثر کمبود آهن؛

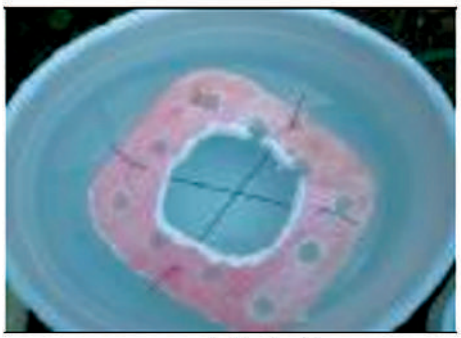
ب) رشد مجدد بافت های گیاهی با رفع کمبود آهن.

شکل ۱۲. مشکلات متداول سیستم گیاه‌پالایی در مرحله‌ی رشد گیاهی.

از بین‌رفتن برگ‌های گیاهان شد (شکل ۱۲)، در حالی‌که ترمیم محلول با مقدار ذکرشده‌ی ترکیبات آهن، باعث رویش مجدد برگ‌ها و سایر اندام‌های هوایی گیاهان شده است. بنا به این دلایل استفاده از سیستم هایدروپونیک بستر جامد یعنی استفاده از محلول هوگلند در بستر شن و ماسه در بسیاری از موارد مثلاً در گونه‌ی موردمطالعه‌ی این تحقیق کاربری آسان‌تری خواهد داشت. اما اگر پالایش حجم زیادی از پساب موردنظر باشد، طراحی سیستمی برای خروج گیاهان از بستر شن در حالی‌که مرحله‌ی رشد را سپری می‌کنند و آماده‌ی ورود به مرحله‌ی پالایش هستند، را ضروری می‌سازد. در سیستم هایدروپونیک، خروج گیاهان دو ماه رشدیافته در بستر جامد و انتقال آن‌ها به بستر مایع نیز انجام گرفته است. این بستر مایع می‌تواند پساب، محلول و یا پساب حاوی عناصر غذایی برای ادامه‌ی فعالیت گیاه باشد. چون مدت زمان جذب ۱۴ روز پیش‌بینی شده است، ریشه‌ی گیاهان انتخاب‌شده برای جذب فلز موردنظر، عمل پالایش را انجام می‌دهند (شکل ۱۳). روش فوق برای بذرهایی از قبیل *(Chenopodium album)* مناسب است که جوانه‌زنی آن‌ها در شن انجام می‌گیرد نه در بستر مایع. همچنین استفاده از یک گونه‌ی گیاهی در پالایش زیستی مستلزم کنترل شرایط زیست‌محیطی و فراهم‌کردن این شرایط در کلیه‌ی مراحل جذب است. در مطالعه‌یی که در زمینه‌ی استفاده از گیاهان برای جذب فلزات از محلول‌ها انجام شده است؛ دو گونه‌ی گیاهی که در شرایط زیستی کاملاً یکسان قرار دارند، نسبت به تنش‌های محیطی واکنش‌های کاملاً متفاوت نشان می‌دهند. *Calendula alata* و *Amaranthus Cruentus* به‌منظور مطالعات پالایش زیستی در معرض رشد هایدروپونیک در شرایط کاملاً یکسان بوده‌اند. دمای بیشینه در روز تهیه‌ی تصویر (۵ مرداد ۱۳۸۸) در محل کشت گیاهان ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ثبت شده است که باعث از بین‌رفتن گونه‌ی اول و ادامه‌ی رشد گونه‌ی دوم می‌شود (شکل ۱۴). بنابراین برای استفاده‌ی صنعتی از گیاهان به‌منظور پالایش زیستی مرحله‌ی اول که مرحله‌ی رشد گیاهان تا زمان موردنظر است، نیازمند انتخاب دقیق گیاهان و پیش‌بینی مقاومت گیاهان درمقابل تغییر شرایط اکولوژیکی یا ثابت‌نگهداشتن پارامترهای زیست‌محیطی است. گیاهان محدودی توان انتقال سزیم به بخش‌های هوایی گیاه را دارند.[۲۳] همانند گیاهان موردمطالعه‌ی این پژوهش، گیاه *Chromolaena odorata* می‌تواند سزیم را به بخش‌های هوایی گیاه منتقل و امکان چیدن بخش‌های هوایی آلوده به سزیم در گیاه را فراهم کند و به اندام‌های هوایی جدید گیاه امکان ادامه‌ی فرایند را بدهد.[۲۴] در مطالعه‌یی که بر روی گیاه *Helianthus annuus* L. کشت‌یافته در سیستم هایدروپونیک انجام گرفته است، رادیواکتیویته‌ی سزیم ۱۳۷ در گیاهان پس از ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۶ و ۳۲ روز اندازه‌گیری و در پایان ۳۲ روز ۱۲٪ سزیم در گیاهان جذب شد.[۲۵] در این پژوهش در غلظت ۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر سزیم کلراید پس از ۱۴ روز بیش از ۶۸٪ یون‌های سزیم از پساب پالایش می‌شود. در شرایط مشابه هنگامی‌که *Amaranthus chlorostachys* و *Calendula alata* در معرض جذب سزیم قرار گرفتند، درصد پالایش به‌ترتیب بیش از ۴۵٪ و ۴۶٪ محاسبه شد.[۲۶] خانواده‌ی آمارانتاسه و آستراسه از گیاهان مناسب در پالایش سزیم به‌شمار می‌روند.[۳] گونه‌ی موردمطالعه‌ی این پژوهش متعلق به خانواده‌ی Chenopodiaceae است و بیش از ۶۸٪ کارایی پالایش نشان می‌دهد. در غلظت‌های بالاتر مثلاً ۵ میلی‌گرم در لیتر محلول سزیم کلراید، توان پالایش *Calendula alata*، *Chenopodium album* و *Amaranthus chlorostachys* به‌ترتیب بیش از ۵۲٪، ۵۲/۹٪ و ۴۱٪ است.[۲۷] در مقایسه‌ی این سه گونه می‌توان گفت: *Chenopodium album* توان پالایش بیشتری دارد، اما با افزایش غلظت سزیم در محلول از کارایی پالایش آن کاسته شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین کارایی جذب از محلول‌ها در کمترین غلظت سزیم

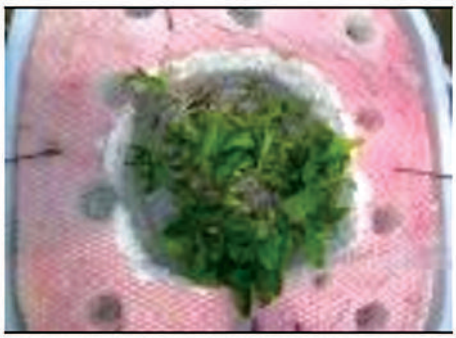
Archive of SID
www.SID.ir

۱) رویش بذر روی توری درون شن؛

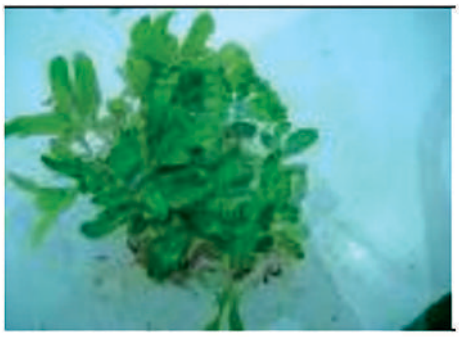


۴) صفحه نگهدارنده توری؛

۲) آبیاری با هوگلند در بستر جامد؛



۵) انتقال به سیستم هایدروپونیک بستر مایع؛



۳) خروج گیاهان دوماهه توسط توری از شن؛

۶) رشد در سیستم هایدروپونیک بستر مایع.

شکل ۱۳. مرحله‌ی ۱ و ۲ رشد Calendula alata در سیستم هایدروپونیک بستر جامد، مرحله‌ی ۳ تا ۶ انتقال به سیستم هایدروپونیک بستر مایع.

شکل ۱۴. تفاوت واکنش‌های گونه‌های انتخاب‌شده برای گیاه‌پالایی در مقابل متغیرهای محیطی.

(۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر) به‌دست‌آمده است. گیاهان درغلظت‌های مختلف فلزات به‌منزله‌ی آلاینده، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. حتی گیاهان متعلق به یک گونه نیز در جذب فلزات رفتار متفاوتی دارند،[۲۲] و به همین ترتیب تفاوت‌های درون‌گونه‌یی و برون‌گونه‌یی نیز بسیار مشاهده می‌شود. در این پژوهش توان پالایش سزیم با افزایش غلظت سزیم کلراید تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است. با افزایش غلظت سزیم کلراید تا ۵ میلی‌گرم بر لیتر دوباره توان پالایش گیاه افزایش می‌یابد. گیاه قادر به تجمع سزیم در بخش‌های هوایی است و با افزایش غلظت محلول، غلظت سزیم درگیاه نیز افزایش می‌یابد. آنچه در مورد این گیاه در مطالعات قبلی به‌دست آمده است، نشان می‌دهد که این گیاه فلزات سنگین را در ریشه جمع و از انتقال آن به برگ‌ها خودداری می‌کند،[۲۳] ولی در مورد سزیم مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت سزیم محلول، انتقال آن به برگ‌های این گیاه نیز افزایش می‌یابد.

www.SID.ir

نتیجه‌گیری

گیاه *Chenopodium album* به علف‌های هرز تعلق دارد و سریع‌الرشد است بنابراین گزینه مناسبی برای گیاه پالایی محلول‌های حاوی سزیم است. همچنین شرکت سزیم در ساختمان‌کریستالی و انباشته‌شدن آن در واکوئل‌ها به گیاه این اجازه را می‌دهد که مقدار بیشتری از سزیم رادیواکتیو را از محیط جذب کند، بدون اینکه به گیاه آسیب جدی وارد آید. کاهش قطر دهانه‌ی آوندی که حاصل افزایش شدت چوبی‌شدن است، نشان‌دهنده‌ی سازگاری گیاه با شرایط تنش و جلوگیری از هدررفتن آب است. به این ترتیب با افزایش ضخامت دیواره‌ی عرضی آوندهای چوبی و کاهش قطر دهانه‌ی آوندها، آب با سرعت بیشتری از آوندها عبور می‌کند. نتیجه اینکه گسترش ساختار پسین، نوعی دفاع گیاه در برابر شرایط تنشی و نامناسب محیط است. با توجه به افزایش تعداد کریستال‌های تشکیل‌شده در اندام‌های هوایی سلمه‌تره و عدم مشاهده‌ی آسیبی در این اندام‌ها و بافت‌های مربوط به آن می‌توان نتیجه گرفت که این گیاه با افزایش سیستم آوند چوب خود موجب افزایش مقدار جذب ماده از محیط می‌شود و با واردکردن سزیم به ساختمان کریستالی با اثرات مخرب آن مبارزه می‌کند و به‌طورکلی توانایی خود را برای جذب این ماده از محیط افزایش می‌دهد.

پانوشت

1. fixation

منابع (References)

1. Salt, D.; Smith, R.D. and Raskin, I. "Phytoremediation", *Ann. Rev. plant Physio. Mol. Biol.,* **49**(1), pp. 643-648 (1998).
2. Eapen, S.; Singh, S.; Thorat, V.; Kaushik, C.P.; Raj, K. and D'Souza, S.F. "Phytoremediation of radio strontium (90Sr) and radio cesium (137Cs) using giant milky weed (Calotropis gigantea R. Br.) plants", *Chemosphere,* **65**(11), pp. 2071-2073 (2006).
3. Singh, S.; Eapen, S.; Thorat, V.; Kaushik, C.P.; Raj, K. and D'Souza, S.F. "Phytoremediation of 137cesium and 90strontium from solutions and low-level nuclear waste by Vetiveria zizanoides", *Ecotoxicology and Environmental Safety,* **69**(2), pp. 306-311 (2008).
4. Chakraborty, D.; Maji, S.; Bandyopadhyay, A. and Basu, S. "Biosorption of Cesium-137 and strontium-90 by mucilaginous seeds of Ocimum basilicum", *Bioresource Technology,* **98**, pp. 2949-2952 (2007).
5. Mun Ho, W.; Hoe Ang, L. and Lee, D. "Assessment of Pb uptake, translocation and immobilization in kenaf (Hibiscus cannabinus L.) for phytoremediation of sand tailings", *Journal of Environmental Sciences,* **20**(11), pp. 1341-1347 (2008).
6. Audet, P. and Charest, C. "Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: Meta-analytical and conceptual perspectives", *Environmental Pollution,* **147**(3), pp. 604-614 (2007).
7. Mant, C.; Costa, S.; Williams, J. and Tambourgi, E. "Phytoremediation of chromium by model constructed wetland", *Bioresource Technology,* **97**(15), pp. 1767-1772 (2006).
8. Eapen, S.; Suseelan, K.N.; Tivarekar, S.; Kotwal, S.A. and Mitra, R. "Potential for rhyzofiltration of uranium using hairy root cultures of Brassica juncea and Chenopodium amaranticolor", *Environmental Research,* **91**(2), pp. 127-133 (2003).
9. Willey, N.J.; Tang, S. and Watt, N.R. "Predicting inter-taxa differences in plant uptake of cesium-134/137", *Journal of Environmental Quality,* **34**(5), pp. 1478-1489 (2005).
10. Cook, L.L.; Inouye, R.S.; McGounigle, T.P. and White, G.J. "The distribution of stable cesium in soils and plants of the eastern snake river plain in southern Idaho", *Journal of Arid Environments,* **69**(1), pp. 40-64 (2007).
11. Pivetz, Bruce E., Ground Water Issue, *Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites*, EPA/540/S-01/500 (2001).
12. Faure, G. "Principles and applications of geochemistry", 2nd Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., pp. 600 (1998).
13. Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. "Trace elements in soils and plants", CRC Pr., Boca Raton, FL, pp. 315 (1984).
14. White, P.J. and Broadley, M.R. "Mechanisms of caesium uptake by plants", *Tinsley Review No. 113. New Phytology,* **147**, pp. 241-256 (2000).
15. Menzel, R.G. "Soil-plant relationships of radioactive elements", *Health Physics,* **11**, pp. 1325-1332 (1965).
16. Resnik, M.C.; Lunt, O.R. and Wallace, A. "Cs, K, Sr and Ca transport in two different plant species", *Soil Science,* **108**, pp. 64-73 (1969).
17. Staunton, S. "On the mechanisms which determine the fate of radiocesium in soil", *Analusis Magazine,* **25**, pp. 24-28 (1997).
18. Delvaux, B.; Kruyts, N.; Maes, E. and Smolders, E. "Fate of radiocesium in soil and rhizosphere", In: Gobran, G.R., Wenzel, W.W., Lombi, E. (Eds.), Trace Elements in the Rhizosphere. CRC Press, Boca Raton, FL, (Chapter 4), pp. 61-91 (2001).
19. Banerjee, D.; Rao, M.A.; Gabriel, J. and Samanta, S.K. "Recovery of purified radiocesium from acidic solution using ammonium molybdophosphate and resorcinol formaldehyde polycondensate resin", *De Salination,* **232**, pp. 172-180 (2008).
20. Janssen Martien, P.M.; Glastra, P. and Lembrechts Johan, F.M. "Uptake of cesium134 by the earthworm species eisenia foetida and lumbricus rubellus", Environmental Toxicology and Chemistry, PP. 837-877 (1995).

Archive of SID

www.SID.ir

21. Karbassi, A.; Monavari, S.M. and Moogouei, R. "Environmental management of aquaculture in the area of Sarab Gerdu", *Environmental Science and Technology,* **10**(1), pp. 159-169 (1387).
22. Ogbo Erute, M.; Avwerosovwe, U. and Gloria Odogu, G., "Screening of four common Nigerian weeds for use in phytoremediation of soil contaminated with spent lubricating oil African", *Journal of Plant Science,* **3**(5), pp. 102-106 (2009).
23. Del Rio-Celestino, M.; Font, R.; Moreno-Rojas, R. and De Haro-Bailon, A. "Uptake of lead and zinc by wild plants growing on contaminated soils industrial crops and products", **24**, pp. 230-237 (2006).
24. Singh, S.; Thorat, V.; Kaushik, C.P.; Raj, K.; Fapen, S. and D'Souza, S.F. "Potential of chromolaena odorata for phytoremediation of 137Cs from solution and low level nuclear waste", *Journal Hazard. Mater,* **162**, pp. 743-745 (2009).
25. Soudek, P.; Valenova', S.; Vavri'kova', Z. and Vanek, T. "137Cs and 90Sr uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions", *Journal Environ. Radioactiv,* **88**(3), pp. 236-250 (2006).
26. Borghei, M.; Arjmandi, R. and Moogouei, R. "Potential of calendula alata for phytoremediation of stable cesium and lead from solutions", Environ. Monit. Assess., DOI 10.1007/s10661-010-1813-9 (2011).
27. Shah, M. and Nongkynrih, A. "Metal hyperaccumulation and bioremediation", *Biologia Plantarum,* **51**(4), pp. 618-634 (2007).

Archive of SID

www.SID.ir