

استفاده از روش گیاه‌پالایی در پالایش سزیم پایدار از محلول‌ها

مهدی برقی (استاد)

مرکز تحقیقات مهندسی بیوشیمی، دانشگاه صنعتی شریف

رکسانا موگونی* (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)

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

گلناز تجدد (استادیار)

گروه زیست‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

مهندسی عمران شریف
دوری ۲-۲۸، شماری ۳، ص. ۹۷-۸۹

mborghei@sharif.edu
r_moogoui@iautnb.ac.ir
rezaarjmandi@yahoo.com
vosoughi@sharif.edu
gtajadod@yahoo.com

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

۱. مقدمه

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.^[۱۱،۱۰] سزیم پایدار در صخره‌های رسوبی و خاک تا غلظتی معادل ۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وجود دارد،^[۱۳،۱۲] 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،^[۱۶،۱۵] و با توسعه‌ی فناوری‌های هسته‌یی مورد استفاده 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، تمایز 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 دو گونه علف هرز *Chenopodium album*

از مهم‌ترین نگرش‌ها به فناوری 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.^[۲-۱] 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.^[۸-۵،۲] عمده‌ترین رادیونوکلوئید مصنوعی ناشی از شکافت هسته‌یی اورانیوم، رادیویزوتوپ سزیم ۱۳۷ است. این عنصر می‌تواند در طول زنجیره‌ی غذایی حرکت و وارد بدن انسان‌ها شود.^[۹] پالایش مؤثر رادیونوکلوئیدهایی از قبیل سزیم ۱۳۷ از خاک‌ها و محلول‌های آلوده، به‌ویژه پالایش در محل، برای کاهش ریسک آلودگی

* نویسنده مسئول

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

Chenopodium scoporia برای استقرار در سیستم کشت هایدروپونیک است. نحوه‌ی رویش گیاهان تا رسیدن به مرحله‌ی مناسب عملیات پالایش از اهداف دیگر آن است. کارایی پالایش سزیم از محلول‌ها، میزان تجمع سزیم در گیاهان 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 بذرنه‌های 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 در کشور رویش داشته و سریع‌الرشد باشند، اهمیت ویژه‌ی دارد. بنابراین، گونه‌هایی از خانواده‌ی *Chenopodiaceae*، *Chenopodium album* و *Chenopodium scoporia* مورد آزمایش قرار گرفتند. در دو آزمایش هم‌زمان در دمای ۱۳ درجه به مدت ۴۸ ساعت این دو بذر در فضای تاریک در آب به صورت 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 آلوم 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 به تدریج جوانه‌های آلوم تبدیل به گیاهچه شدند اما جوانه‌های اسکوپوریا خشک شد (شکل ۱). لازم به یادآوری است که این گونه 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.

۲.۱. سیستم‌های کشت هایدروپونیک

کشت هایدروپونیک: به‌طور کلی 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 سنگ ریزه.

۲. سیستم بسته: محلول غذایی دوباره استفاده می‌شود و به عبارت دیگر محلول در یک چرخه قرار می‌گیرد که به آن فقط آب و مواد غذایی کاهش یافته 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 بذرها کشت شده بستگی دارد. طرح اولیه‌ی ظروف در شکل ۱ نمایش داده شده است. گیاهان به مدت 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

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

عناصر غذایی ماکرو	g/1L	میلی لیتر استاک در ۲۴۰ لیتر محلول
NH ₄ H ₂ PO ₄	۲۷٫۶	۲۴۰
KNO ₃	۱۵۴٫۰۸	۱۴۴۰
Ca(NO ₃) ₂ ·۴H ₂ O	۲۲۶٫۵۶	۹۶۰
MgSO ₄ ·۷H ₂ O	۱۱۸٫۰۸	۴۸۰
Fe-EDTA	۱٫۸	۳۶۰
عناصر غذایی میکرو	g/1L	میلی لیتر استاک در ۲۴۰ لیتر محلول
H ₃ BO ₃	۰٫۹	
ZnSO ₄ ·۷H ₂ O	۰٫۵۲	
MnSO ₄ ·۴H ₂ O	۲٫۴	۲۴۰
CuSO ₄ ·۵H ₂ O	۰٫۱۹	
(NH ₄) ₆ MO ₇ ·O _{۲۴} ·۴H ₂ O	۰٫۴۸	

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 به صورت یک محلول تهیه می‌شوند. به عبارت دیگر 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 CH₃COOH یا HNO₃ 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.

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 به مدت ۱۴ روز در معرض جذب سزیم از محلول سزیم‌کلراید با سه غلظت ۲، ۵ و ۱۰ 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 به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. بافت‌های خشک گیاه در (۵:۱، V:V) HNO₃:HClO₄ هضم و غلظت سزیم با دستگاه جذب اتمی تعیین شد.



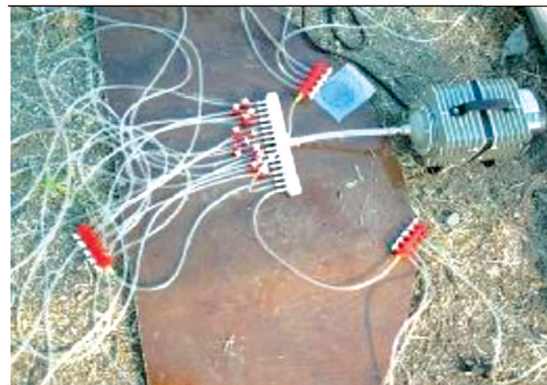
ب) بذر *Chenopodium album*.



الف) بذر *Chenopodium scopolia*.



د) اجزای سیستم هایدروپونیک بستر مایع؛



ج) هوادهی سیستم هایدروپونیک بستر مایع؛



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



ه) جذب سزیم توسط *Chenopodium album*.

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

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 قرار گرفته‌اند. 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،^[۲۱] 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 ویژه‌ی دارد.

۴.۲. بررسی بافت‌های *Chenopodium album*

اندام‌های هوایی گیاه شامل ساقه، دم‌برگ و برگ پس از جداسازی در محلول اکل و گلیسرین به نسبت مساوی برای فیکساسیون^۱ 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 معنی‌دار بودن اختلاف داده‌ها بررسی شد.

جدول ۲. غلظت و درصد جذب سزیم در گیاه و محلول‌های مختلف (داده‌ها و میانگین سه تکرار) و اختلاف داده‌ها (در سطح * معنی‌دار $p < 0.05$).

گیاه	غلظت اولیه در محلول mg l^{-1}	غلظت نهایی در محلول mg l^{-1}	غلظت در گیاه mg kg^{-1}	درصد پالایش (%)*
<i>C. album</i>	۰۰/۰۰	۰۰/۰۰	۰۰/۰۰	۰۰/۰۰
<i>C. album</i>	۰/۴۷	۰/۱۵±۰/۰۱	۳۹۶/۱۶±۶/۳۳	۶۸/۰۸±۲/۱۲
<i>C. album</i>	۱/۵۸	۰/۹۵±۰/۰۵	۵۲۱/۴±۴۵/۶۵	۳۹/۶۶±۳/۴۸
<i>C. album</i>	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

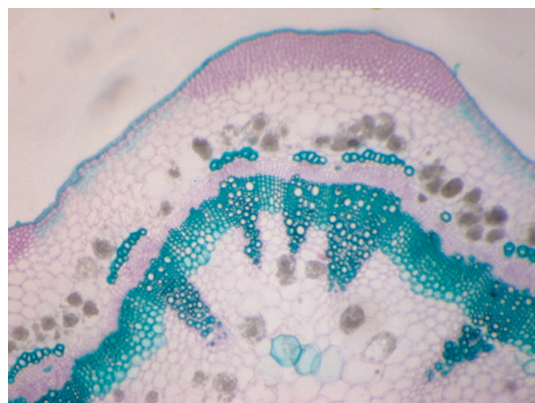
براساس مطالعات انجام‌شده در *Chenopodium album*، ساقه با یک لایه‌ی اپیدرم کوتیکولی پوشیده شده است. هیپودرم شامل چندین ردیف از سلول‌های کلانشیم است. کلانشیم منقطع و شامل ۸ تا ۱۰ توده است. فاصله‌ی ناحیه‌ی پوست و بافت پارانشیم با آندودرم مشخص و دارای بافت اسکلرانشیم به‌صورت پراکنده‌اند. سلول‌های بافت پارانشیم 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

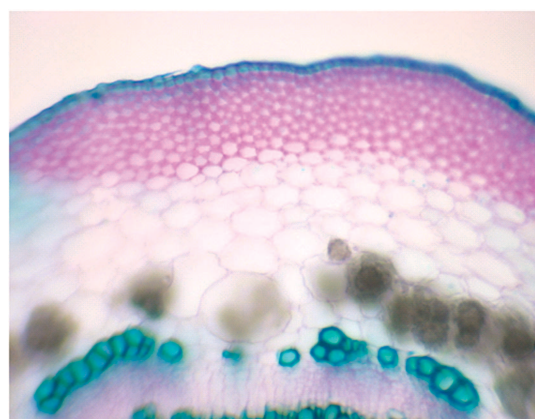
مطالعه بر روی رشد پسین *Chenopodium album* نشان داد که در این زمان تعداد لانه‌ی بافت کلانشیم در زیر اپیدرم افزایش یافته و بر تعداد فیبرهای قرارگرفته در روی آوندهای آبکش هم افزوده شده است (شکل ۳). کامبیوم‌های بین آوندی به هم ملحق می‌شوند و تشکیل یک حلقه‌ی کامبیومی با دستجات آوندی اولیه را می‌دهند. این حلقه به‌طور غیرطبیعی بندهای فیبری را در ناحیه‌ی کامبیوم بین آوندی 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 آنموسیستیک دارند (شکل ۶).



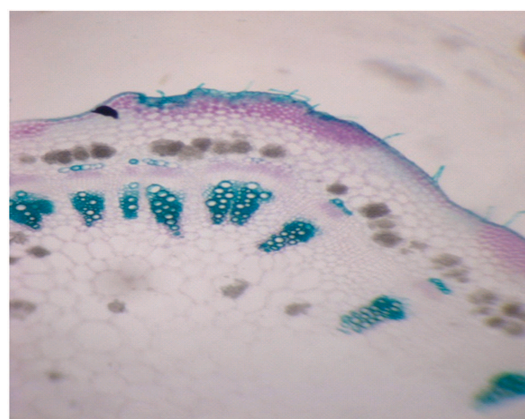
شکل ۳. ساختار پسین ساقه (شاهد- ۱۵×).



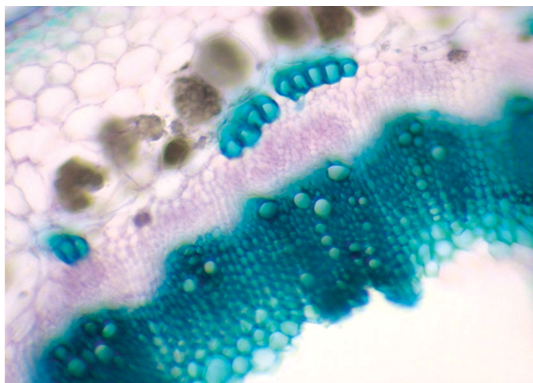
شکل ۴. افزایش تعداد بلورها با تشکیل بافت پسین (۴۰×).



شکل ۵. برگ (شاهد ۲۰×).



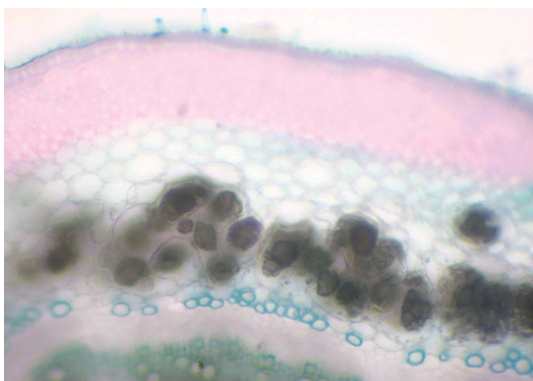
شکل ۲. ساختار نخستین ساقه‌ی *Chenopodium album* (شاهد- ۱۰×).



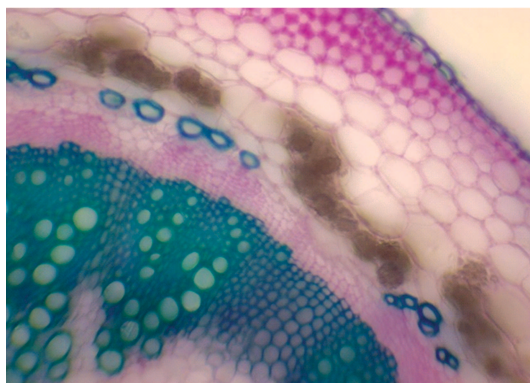
شکل ۸. افزایش تراکم بافت آوندی ساقه - تیمار با سزیم کلراید 5 mg l^{-1} ($\times 20$).



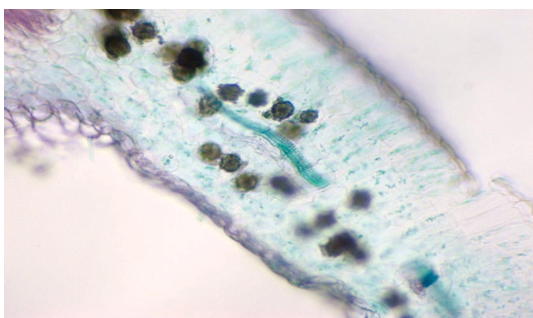
شکل ۶. روزنه‌ی تیپ آنوسیتیک ($\times 40$).



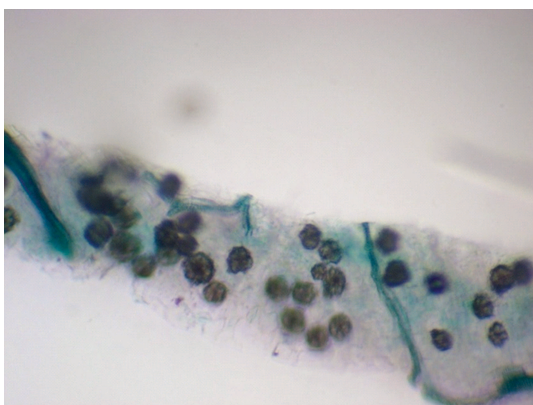
شکل ۹. افزایش تعداد بلورها در ساقه - تیمار با سزیم کلراید 5 mg l^{-1} ($\times 40$).



شکل ۷. افزایش رنگ‌پذیری بافت ساقه، تیمار با سزیم کلراید 2 mg l^{-1} ($\times 20$).



شکل ۱۰. افزایش تراکم بلورها و رنگ‌پذیری در بافت برگ، تیمار با سزیم کلراید 2 mg l^{-1} ($\times 20$).



شکل ۱۱. افزایش تراکم بلورها و رنگ‌پذیری در بافت برگ، برگ تیمار با سزیم کلراید 5 mg l^{-1} ($\times 20$).

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 در گیاه و انباشته شدن آن در اندام‌های هوایی (ساقه و برگ)، تغییراتی در این اندام‌ها صورت می‌گیرد که با افزایش غلظت سزیم این تغییرات شدیدترند. تغییرات قابل مشاهده بر اثر جذب و انباشت سزیم را می‌توان به سه دسته 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 در گیاهان 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 برداری این گیاهان در تحمل محیط‌های آلوده است.^[۲۲] از سوی دیگر تفاوت آشکاری در میان گونه‌های گیاهی از نظر حد برداری، تجمع و جذب فلزات وجود دارد. بنابراین در مرحله‌ی اول مطالعات گیاه‌پالایی، غربال‌گری نوع گونه‌های گیاهی اهمیت ویژه‌ی دارد. در غربال‌گری گونه‌های گیاهی برای جذب

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 و 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 در ساخت هورگلدن 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 هورگلدن باعث

از بین رفتن 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 هورگلدن در بستر شن و ماسه در بسیاری از موارد مثلاً در گونه‌ی مورد مطالعه‌ی 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 رشد یافته 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 بذریه‌ای 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 مطالعه‌ی 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 بین رفتن 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 در مقابل تغییر شرایط اکولوژیکی یا ثابت‌نگهداشتن پارامترهای زیست‌محیطی است. گیاهان محدودی توان انتقال سزیم به بخش‌های هوایی گیاه را دارند.^[۲۳] همانند گیاهان مورد مطالعه‌ی 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 مطالعه‌ی که بر روی گیاه *Helianthus annuus* L. کشت یافته 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 مورد مطالعه‌ی 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 به‌دست آمده، بیشترین کارایی جذب از محلول‌ها در کمترین غلظت سزیم

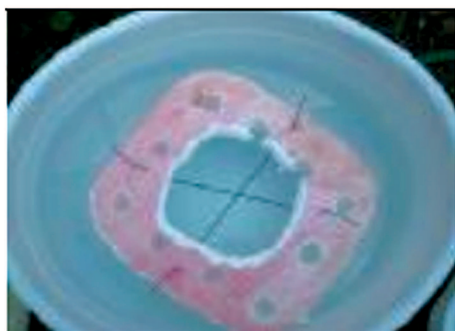


الف) کلروزیس برگ گیاه بر اثر کمبود آهن؛



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

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



۴) صفحه نگهدارنده توری؛



۱) رویش بذر روی توری درون شن؛



۵) انتقال به سیستم هایدرپونیک بستر مایع؛



۲) آبیاری با هوگلند در بستر جامد؛



۶) رشد در سیستم هایدرپونیک بستر مایع.



۳) خروج گیاهان دوماهه توسط توری از شن؛

شکل ۱۳. مرحله ی ۱ و ۲ رشد *Calendula alata* در سیستم هایدرپونیک بستر جامد، مرحله ی ۳ تا ۶ انتقال به سیستم هایدرپونیک بستر مایع.

(۵/۰ میلی گرم بر لیتر) به دست آمده است. گیاهان در غلظت های مختلف فلزات به منزله ی آلاینده، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهند. حتی گیاهان متعلق به یک گونه نیز در جذب فلزات رفتار متفاوتی دارند،^[۲۷] و به همین ترتیب تفاوت های درون گونه یی و برون گونه یی نیز بسیار مشاهده می شود. در این پژوهش توان پالایش سزیم با افزایش غلظت سزیم کلراید تا ۲ میلی گرم بر لیتر کاهش یافته است. با افزایش غلظت سزیم کلراید تا ۵ میلی گرم بر لیتر دوباره توان پالایش گیاه افزایش می یابد. گیاه قادر به تجمع سزیم در بخش های هوایی است و با افزایش غلظت محلول، غلظت سزیم در گیاه نیز افزایش می یابد. آنچه در مورد این گیاه در مطالعات قبلی به دست آمده است، نشان می دهد که این گیاه فلزات سنگین را در ریشه جمع و از انتقال آن به برگ ها خودداری می کند،^[۲۳] ولی در مورد سزیم مشاهده می شود که با افزایش غلظت سزیم محلول، انتقال آن به برگ های این گیاه نیز افزایش می یابد.



شکل ۱۴. تفاوت واکنش های گونه های انتخاب شده برای گیاه پالایی در مقابل متغیرهای محیطی.

نتیجه گیری

گیاه *Chenopodium album* به علف های هرز تعلق دارد و سریع الرشد است بنابراین گزینه مناسبی برای گیاه پالایی محلول های حاوی سزیم است. همچنین شرکت سزیم در ساختمان کریستالی و انباشته شدن آن در واکوئل ها به گیاه این اجازه را می دهد که مقدار بیشتری از سزیم رادیواکتیو را از محیط جذب کند، بدون اینکه به گیاه آسیب جدی وارد آید. کاهش قطر دهانه ی آوندی که حاصل افزایش شدت چوبی شدن است، نشان دهنده ی سازگاری گیاه با شرایط تنش و جلوگیری از هدر رفتن

آب است. به این ترتیب با افزایش ضخامت دیواره ی عرضی آوندهای چوبی و کاهش قطر دهانه ی آوندها، آب با سرعت بیشتری از آوندها عبور می کند. نتیجه اینکه گسترش ساختار پسین، نوعی دفاع گیاه در برابر شرایط تنشی و نامناسب محیط است. با توجه به افزایش تعداد کریستال های تشکیل شده در اندام های هوایی سلیمه تره و عدم مشاهده ی آسیبی در این اندام ها و بافت های مربوط به آن می توان نتیجه گرفت که این گیاه با افزایش سیستم آوند چوب خود موجب افزایش مقدار جذب ماده از محیط می شود و با وارد کردن سزیم به ساختمان کریستالی با اثرات مخرب آن مبارزه می کند و به طور کلی توانایی خود را برای جذب این ماده از محیط افزایش می دهد.

پانویس

1. fixation

منابع (References)

1. Salt, D.; Smith, R.D. and Raskin, I. "Phytoremediation", *Ann. Rev. plant Physiol. 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 zizanioides*", *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 rhizofiltration 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", *Analysis Magazine*, **25**, pp. 24-28 (1997).
18. Delvaux, B.; Kruyts, N.; Maes, E. and Smolders, E. "Fate of radiocesium in soil and rhizosphere", In: Go-bran, 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).

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.; Eapen, S. and D'Souza, S.F. "Potential of chromolaena odorata for phytoremediation of ^{137}Cs 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. " ^{137}Cs and ^{90}Sr 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).