

حذف زیستی کادمیوم به وسیله عدسک آبی (پتانسیل یابی پالایش سبز آب و پساب)

امیر پرنیان^{۱*}، مصطفی چرم^۱، نعمت اله جعفرزاده حقیقی فرد^۲، مهری دیناروند^۴

(تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۲)

چکیده

کادمیوم عنصری مضر برای حیات و آلاینده‌ای خطرناک به‌شمار می‌رود. این عنصر از طریق پساب‌ها، زهاب‌ها و فاضلاب‌ها (شهری و صنعتی) سبب آلودگی، کاهش کیفیت و گاهی سمیت منابع آب می‌گردد. با افزایش جمعیت و نیاز به منابع آب بیشتر، هم‌چنین افزایش آلوده شدن این منابع آبی ارزشمند، نیاز شدیدی به روش‌های نو و ارزان برای پالایش و بهبود کیفیت آب‌ها احساس می‌شود. گیاه پالایی با گیاهان آبی روشی مؤثر و ارزان برای بهبود کیفیت آب و پساب‌هاست. هدف از این مطالعه پتانسیل یابی حذف زیستی کادمیوم به وسیله عدسک آبی از محیط‌های آبی است که برای دست‌یابی به آن مهم، پس از تعیین pH بهینه‌ی رشد عدسک آبی (*Lemna gibba L.*)، این گیاه طی ۱۱ روز در محلول غذایی هوگلند، آلوده به ۴ سطح مختلف کادمیوم (۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم در لیتر) کشت شد و با اندازه‌گیری روزانه‌ی کادمیوم در محلول کشت، هم‌چنین مقدار اولیه و نهایی آن در گیاه حذف زیستی این فلز سنگین از پساب‌ها امکان‌سنجی گردید. اثرات زیستی کادمیوم بر رشد گیاه با اندازه‌گیری شاخص تولید جرم زنده بررسی شد. گیاه عدسک آبی کادمیوم را به مقدار زیادی جذب کرد و کارایی حذف کادمیوم به بیش از ۹۱٪ در سطح آلودگی ۴ میلی‌گرم در لیتر رسید. ضریب انتقال و شاخص جذب حداکثری کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم در لیتر، ۵۱۷/۸۲ و ۹/۳۶ میلی‌گرم به دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار شاخص تولید جرم زنده گیاهی ۲ و ۴/۷۱ گرم در روز، به ترتیب مربوط به سطوح آلودگی ۶ و ۰ (شاهد) میلی‌گرم در لیتر بود. پالایش زیستی کادمیوم به کمک عدسک آبی که گیاه بومی آبگیرهای جنوب ایران است، در محیط مصنوعی امکان‌پذیر است و بررسی پتانسیل آن در گیاه پالایی نیکل از پساب‌های آلوده پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: گیاه پالایی پساب؛ کادمیوم؛ عدسک آبی؛ گیاهان آبی

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲. گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز.
۳. مرکز تحقیقات فن‌آوری‌های زیست محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز.
۴. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز و گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amir.parnian86@gmail.com

مقدمه

منابع آبی محدودی در دسترس انسان است. عمده‌ی منابع مورد مصرف انسان دریاچه‌ها، رودها، رطوبت خاک و آب زیرزمینی است. آب تالاب‌ها و رودها تحت اثر فعالیت شدید انسان، با ورود رسوب، پساب‌های کشاورزی و صنعتی و فاضلاب‌ها آلوده شده‌اند. استفاده از روشی مؤثر و ارزان برای کاهش اثرات نامطلوب این فاضلاب‌ها و پساب‌ها بر کیفیت آب ضروری است (۳). در همین راستا روش‌های بسیار متعددی برای کاهش آلودگی‌های آب و پساب ایجاد شده‌است، از جمله این روش‌ها می‌توان اسمز معکوس، تبادل یونی، سیستم بیوراکتوری با غشاء تبادل یونی، احیاء کاتالیتیک، و دیگر روش‌های مبتنی بر فرایندهای زیستی و شیمیایی و فیزیکی را نام برد (۱۴).

کادمیوم از فلزات سنگین مورد استفاده در صنعت می‌باشد. ورود کادمیوم به محیط زیست معمولاً با ورود فاضلاب کارخانجات صنعتی انجام می‌گیرد. منابع اصلی کادمیوم ره‌اشده در فاضلاب شامل گداختن فلز، آب‌کاری، ساخت پلاستیک، رنگ‌سازی، باتری‌سازی، کودسازی، معدن‌کاوی و خالص‌سازی فلزات است (۷). این آلاینده فلزی پس از ورود به خاک، توسط آب باران شسته‌شده و به آب‌های زیرزمینی و سطحی منتقل می‌شود. کادمیوم معمولاً از این طریق وارد زنجیره غذایی می‌شود. کادمیوم از طریق ریشه و برگ جذب‌شده و به دام یا انسان منتقل می‌شود و باعث بروز اختلالات متابولیکی می‌شود. کادمیوم می‌تواند با راه‌اندازی مسیرهای تنش اکسیداتیو در سلول سبب آسیب به بخش‌های مختلف سلول از جمله ماده ژنتیکی موجود در هسته‌شده که موجب پیری زودرس در سلول‌ها می‌شود (۱۰ و ۱۱). این فلز باعث پوکی استخوان، عدم کارایی ریه، صدمه به کبد و ایجاد تنش بالا در انسان‌هاست. براساس این مضرات برای سلامتی انسان، این عنصر جزو آلاینده‌های درجه اول در لیست قرمز سازمان محیط زیست آمریکا قرار دارد. آژانس حفاظت

محیط زیست آمریکا (Environmental Protection Agency, EPA) از آن به‌عنوان ماده‌ای با احتمال سرطان‌زایی نام برده‌است (۷).

گیاه‌پالایی یا پالایش سبز استفاده از گیاهان، یا دیگر موجودات فتوسنتزکننده، برای کاهش آلاینده‌های آلی یا غیرآلی در طبیعت، به‌ویژه آب‌ها و خاک‌ها است (۲۴). گیاه‌پالایی روشی مؤثر در حفظ و بهبود کیفیت این منابع آب پر ارزش می‌باشد (۲۸). گیاه‌پالایی با اهداف خاص می‌تواند بر فاکتورهای کیفی متعددی در محیط از جمله غلظت عناصر کم‌مصرف و عناصر فلزی اثر کند (۲۳ و ۲۷)؛ از جمله‌ی این عناصر فلزی، عناصری هم‌چون آهن، نیکل، کادمیوم، روی، سرب و بسیاری عناصر دیگر به فرم محلول در آب را می‌توان نام برد (۵).

گیاه استخراجی (Phytoextraction) نوعی روش پالایش است که از توانایی گیاه در حذف آلاینده‌ها از آب و خاک‌ها بهره می‌گیرد (۱۲). گیاه‌پالایی محیط‌های آبی با گیاهان آبی (گونه‌هایی مانند: *Eichhornia crassipes* و وارپته‌هایی مانند: *Lemna minor* و *Spirodela polyrrhiza*) روشی مؤثر، کارآمد و ارزان برای حذف نیتروژن و دیگر آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین و عناصر کم‌مصرف از پساب‌ها و آب‌های آلوده است (۱۵ و ۲۵). کاهوی آبی دارای پتانسیل بالایی برای پالایش نیتروژن و فسفر، کاستن سوسپانسون‌های جامد آب و گل‌آلودگی از سیلاب‌ها، و افزایش کیفیت آب است (۱۸). بی و همکاران در بررسی ۵ جمعیت گونه‌ای از گیاه آبی فرگمایتس در دو معدن، جذب، انباشتگی و مقاومت این گیاه را در غلظت‌های مختلف مس بررسی کردند، و نشان دادند که این گیاه برای پالایش آب‌های آلوده به مس مناسب است (۳۰). دباغ و همکاران با استفاده از زیست‌توده‌ی خشک جلبک قهوه‌ای استرانسیوم پایدار و استرانسیوم-۹۰ را از محیط آبی با موفقیت جذب و حذف نمودند (۶). بابایی و همکاران آرسنیک را توسط جلبک ماکروسکوپی کارازا از آب آلوده با راندمان ۷۵٪ طی ۱۹ روز

به رود کارون، در نزدیکی پل پنجم شهر اهواز، و همچنین پساب صنایع فولاد اهواز جمع آوری شد. غلظت کادمیوم نمونه‌ها براساس روش استاندارد برای آزمایش آب و پساب سازمان سلامت عمومی امریکا تعیین گردید (۲۹).

جمع آوری، کشت، تطبیق، تکثیر و آماده‌سازی گیاهان برای حذف کادمیوم

از گیاه آبی عدسک آبی (*Lemna gibba* L.) برای پالایش فلز سنگین کادمیوم از محیط شبیه‌سازی شده استفاده شد. عدسک آبی که نوعی گیاه آبی معلق است (۹)، از آبگیر روستای سویسه واقع در جاده‌ی اهواز-آبادان جمع آوری شد. پس از شستشو با آب شهر، در محیط گلخانه، به مدت ۴ هفته در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز در ظروف ۳۵ لیتری مسطح حاوی محلول نیم‌غلظت هوگلند (۳/۰ میلی‌مولار KNO_3 ، ۲/۰ میلی‌مولار $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ، ۰/۵ میلی‌مولار $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ، ۱/۰ میلی‌مولار MgSO_4 ، ۱۰ میکرومولار Fe-EDTA ، ۱/۵ میکرومولار H_3BO_3 ، ۰/۲۵ میکرومولار MnSO_4 ، ۰/۱ میکرومولار CuSO_4 ، ۰/۲ میکرومولار ZnSO_4 و ۰/۰۲۵ میکرومولار H_2MoO_4) تحت شرایط کنترل شده‌ی دما و رطوبت برای تطبیق با محیط کشت، نگهداری شد تا گیاهان رشد و تکثیر یافته و آماده‌ی کشت آزمایشی گردند.

ایجاد محیط کشت آزمایشی و تعیین pH بهینه برای رشد گیاه و پالایش

گیاهان با توجه به خاستگاه ژنتیکی و تکاملی خود در محیط‌هایی با شرایط اقلیمی، فیزیکی و شیمیایی مختلفی رشد می‌کنند. در طی تکامل و انتخاب طبیعی این گیاهان در مکان‌های اکولوژیک مختلفی پراکنده، تکثیر و تطبیق پیدا کرده‌اند. یکی از این شرایط محیطی مهم و مؤثر در رشد و نمو گیاهی pH محیط جذب عناصر توسط گیاه است. pH عامل مؤثری در جذب عناصر فلزی توسط اندام جذبی گیاه همچنین افزایش یا کاهش غلظت

پالایش کردند (۱). مطالعات بسیاری برای پالایش فلزات سنگین از محیط‌های آبی توسط عدسک و دیگر گیاهان آبی انجام شده‌است. خلف و زرداثویی (۱۷) که روی را توسط عدسک آبی، میرتزکی و همکاران (۲۱) سرب را توسط علف شاخی، میسرا و تریپاتی (۲۲) سه عنصر سنگین را توسط سه گیاه آبی با فرم‌های رویشی متفاوت، آرویند و پراسد (۱۳) کادمیوم را توسط علف شاخی و کارا و همکاران (۱۶) نیکل را به وسیله‌ی عدسک آبی از محیط‌های مایع جذب و حذف نمودند. در تمامی این پژوهش‌ها کاهش چشمگیری در غلظت فلزات سنگین گزارش شده‌است. اما مطالعات اندکی برای پالایش کادمیوم توسط این جنس بومی جنوب ایران (*Lemna gibba* L.) در دسترس می‌باشد. لذا هدف این پژوهش، بررسی حذف زیستی کادمیوم به وسیله عدسک آبی (*Lemna gibba*) بود.

مواد و روش‌ها

محل آزمایش

آزمایش‌های این پژوهش در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، در ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی، با ارتفاع متوسط ۲۰ متر از سطح دریا، از آبان تا آذر ۱۳۸۸ انجام شد. طی مراحل آزمایش شرایط اقلیمی شامل دما 24 ± 5 درجه‌ی سانتی‌گراد، میانگین رطوبت $55 \pm 25\%$ ، تشعشع کل بین $W m^2$ تا ۶۵۰ تا ۱۱۰۰ وات بر مترمربع و تشعشع خالص بین ۴۰۰ تا ۱۰۵۰ وات بر مترمربع در تغییر بود.

نمونه برداری فاضلاب

برای به دست آوردن تخمینی از مقدار آلودگی و تهیه غلظت‌های کادمیوم برای آزمایشات نهایی حذف کادمیوم، نمونه‌هایی از فاضلاب آلوده به کادمیوم در زمان‌های متفاوت طی ماه‌های تیر، مهر و آبان سال ۱۳۸۹، از یکی از خروجی‌های فاضلاب شهری

گونه‌های فلزی قابل جذب توسط گیاه است (۵).
 به دلایل یادشده، در این پژوهش اثر عامل محیطی pH بر رشد گیاه بررسی شد تا بتوان با تعیین و تنظیم pH بهینه، رشد گیاه را به حداکثر رساند و پالایش پساب با کارایی بیشتری به انجام برسد. بدین منظور گیاهان به مدت ۳ هفته، در ظروف ۲ لیتری حاوی محلول غذایی نیم غلظت هوگلند در ۳ سطح pH ۵/۵، ۷ و ۹/۵ با ۳ تکرار (مجموعاً ۹ ظرف آبکشت) در ظروفی به صورت سامانه‌ی آبکشت بسته (Hydroponic System) کشت شدند (۴).
 طی مدت کشت، pH در محلول بدون آلودگی به صورت روزانه، با افزودن محلول‌های ۰/۱ مولار NaOH و HCl، هم‌چنین در پساب شبیه‌سازی شده که در اثر تبخیر و تعرق دائماً کاهش می‌یافت با افزودن آب مقطر ثابت نگه داشته شد (۱۲).

کشت آزمایشی در محیط مصنوعی

کشت ۱۱ روزه در ظروفی پلاستیکی بر پایه‌ی کشت هیدروپونیک در محیط گلخانه‌ای حاوی ۱/۸ لیتر محلول غذایی نیم غلظت هوگلند (۴)، با ۳ تکرار کادمیوم (Cd⁺⁺) در غلظت‌های ۰ (شاهد)، ۱، ۲، ۴، ۶ میلی‌گرم در لیتر انجام شد. ۱۲ گرم از گیاهان پس از شستن با آب دیونیزه به ظروف کشت انتقال یافت و نشاءها به طور معلق در آن جای گرفت (۱۹). در حین دوره‌ی کشت pH با محلول‌های NaOH و HCl در حدود ۷/۰ به‌طور روزانه تنظیم شد. سپس برای آنالیز مقدار کادمیوم جذب‌شده از محلول نمونه برداری، (با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق روزانه هر روز سطح محلول محیط کشت با آب دیونیزه) ثابت نگه داشته شد. هوادهی نیز بی‌وقفه توسط پمپ‌های هوای کوچک آکواریوم به‌ظروف آبکشت انجام گردید (۴ و ۱۹).

آنالیزهای آب

پس از اندازه‌گیری pH و EC و تصفیه پساب با کاغذ صافی، مقدار عنصر کادمیوم با دستگاه جذب اتمی مجهز به شعله

تعیین وزن تر گیاهان

نمونه‌های گیاهی با یک الک برداشت و با آب دیونیزه شستشو شدند و برای ۲ دقیقه بین ۲ کاغذ خشک‌کن قرار گرفتند. سپس گیاهان توزین شدند تا وزن تر آنها به دست آید (۱۹).

تعیین شاخص تولید جرم زنده گیاهان

شاخص تولید جرم زنده گیاهی (Biomass Production Measurement) به روش زیر محاسبه گردید:

$$Pr = (FW_p - FW_0) / \Delta t$$

(Pr) شاخص تولید جرم زنده گیاهی (گرم بر روز)، FW_p و FW_0 وزن تر خالص گیاه (گرم) به ترتیب در زمان ۱ و ۲ (روز)، Δt اختلاف بین زمان ۱ و ۲ است (۱۹).

تعیین وزن خشک گیاهان

نمونه‌های گیاه با آب دیونیزه شستشو، در آون در دمای ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت حرارت داده شدند تا کاملاً خشک، و سپس با ترازو توزین شد (۱۲).

آنالیز نمونه‌های گیاه

نمونه‌های گیاه با آب دیونیزه شستشو، در آون در دمای ۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک و طور کامل خرد شد. ۰/۵ گرم از هر نمونه را در بوته‌چینی با ۱۵ میلی‌لیتر HNO₃-HClO₄ (نسبت ۱:۳ حجمی) مخلوط و در دمای اتاق تا یک شب به‌حال خود باقی گذاشته شد. سپس به ۱۴۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد رسانده تا هضم کامل گردد. غلظت کادمیوم در محلول هضم‌شده توسط دستگاه جذب اتمی مجهز به شعله (Unicam 939 Germany) بررسی گردید (۱۲).

ضریب انتقال

ضریب انتقال (Transfer Coefficient) یا عامل غلظت زیستی (Bioconcentration Factor, BCF) هر عنصر از تقسیم غلظت عنصر در اندام گیاهی به غلظت کل عنصر در محیط کشت به دست می آید. (۸ و ۱۷).

$$\text{غلظت عنصر در محیط کشت} / \text{غلظت عنصر در اندام گیاهی} =$$

ضریب انتقال عنصر شاخص جذب

شاخص جذب

شاخص جذب (Uptake Index) هر عنصر از حاصلضرب مقدار وزن ماده خشک در غلظت عنصر در اندام قابل برداشت به دست می آید. شاخص جذب معیاری مناسب برای تعیین پالایش عناصر فلزی، و در واقع قوی ترین معیار برای تعیین پتانسیل پالایش گیاه می باشد (۸).

آنالیزهای آماری

این آزمایش به صورت گلخانه ای و در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام گردید و داده های حاصل از تیمارهای کادمیوم در غلظت های ۰ (شاهد)، ۱، ۲، ۴، ۶ میلی گرم در لیتر بود. تجزیه و تحلیل های آماری با استفاده از آمار توصیفی برای نمایش مقادیر جذب کادمیوم و برای مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون دانکن مقادیر جذب کادمیوم و غلظت اولیه به وسیله گیاه، با استفاده از نرم افزار آماری Excel 2007 و SPSS 16 صورت گرفت.

نتایج و بحث

تعیین pH بهینه برای رشد گیاه و پالایش پساب

مطابق شکل ۱ بیشترین رشد ۹۸ گرم (بیشترین وزن تر) مربوط به pH = ۷ بوده است. روند افزایش وزن تر تولیدی در pH های < ۷

۹/۵ < ۵/۵ به دست آمد. با توجه به این که رشد بیشتر نشان از تطابق بهتر و بیشتر این گیاه با pH = ۷ بود، این pH برای پالایش سبز فلز سنگین کادمیوم توسط عدسک آبی در نظر گرفته شد. پژوهش های بسیاری بر روی گیاهان آبی برای به دست آوردن pH بهینه ی جذب عناصر هم چنین تعیین pH بهینه ی پالایش سبز عناصر کمیاب صورت گرفته است. بسته به جنس، گونه و نژادهای بومی هر منطقه گیاهان مورد بررسی نتایج متفاوتی به دست آمده است. از آن جمله می توان به سیجیدجر و همکاران در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد که pH بهینه ی جذب سرب را برای ۲ گیاه آبی (*Typha latifolia* L. و *Ceratophyllum demersum* L.) به ترتیب ۹ و ۷ به دست آوردند (۲۶).

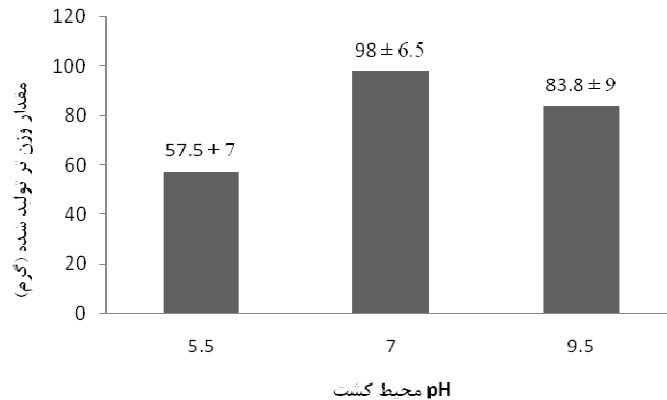
تغییرات غلظت روزانه کادمیوم در پساب شبیه سازی شده

غلظت کادمیوم پساب شبیه سازی شده طی دوره ی تیمارگذاری ۱۱ روزه به طور روزانه اندازه گیری شد، که بیانگر روند کاهشی مقدار کادمیوم در محلول کشت بود. این کاهش با توجه به بسته بودن سیستم کشت نشانه ی حذف کادمیوم از محیط محلول و پالایش پساب شبیه سازی بود.

در شکل ۲ روند کلی تغییرات ۱۱ روزه ی غلظت کادمیوم در محلول کشت آلوده ارائه شده است؛ در این شکل می توان کاهش غلظت کادمیوم را در هر ۴ سطح آلودگی مشاهده کرد، که نشان از جذب کادمیوم به وسیله گیاه عدسک آبی است. در تمامی سطوح آلودگی کادمیوم کاهش چشمگیری رخ داده است. این تغییرات در همه ی موارد از روند کاهشی و لگاریتمی تبعیت می کند.

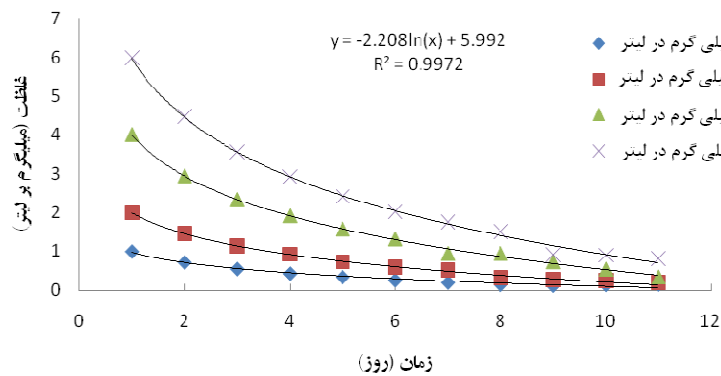
$$R^2 = 0.9972 \quad C = -2.208 \ln(T) + 5.992$$

غلظت نهایی کادمیوم در هر یک از تیمارها در جدول ۱ نشان داده شده است. این جدول کاهش ۸۵، ۹۰، ۹۱/۲۵ و ۸۶/۵ درصدی کادمیوم به ترتیب در سطوح ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی گرم بر لیتر آلودگی را نشان می دهد که بیشترین راندمان جذب در



شکل ۱. pH بهینه برای رشد گیاه و پالایش پساب

(اعداد میانگین وزن تر تولید شده ± انحراف معیار و n = ۳ می باشند)



شکل ۲. روند تغییرات غلظت کادمیوم در محلول غذایی در سطوح مختلف آلودگی

جدول ۱. غلظت اولیه و نهایی و درصد جذب نهایی کادمیوم در محلول غذایی در سطوح مختلف آلودگی

1	2	4	6	غلظت اولیه کادمیوم در پساب شبیه سازی شده (میلی گرم در لیتر)
0/15	0/2	0/35	0/81	غلظت نهایی کادمیوم در پساب شبیه سازی شده (میلی گرم در لیتر)
85 ^a	90 ^a	91/25 ^a	86/5 ^a	درصد جذب 11 روزه کادمیوم

(حروف لاتین براساس آزمون LSD نشانه‌ی اختلافات معنی دار بین میانگین‌ها در سطح ۰/۵ می باشند)

تجمع فلزات سنگین در گیاهان

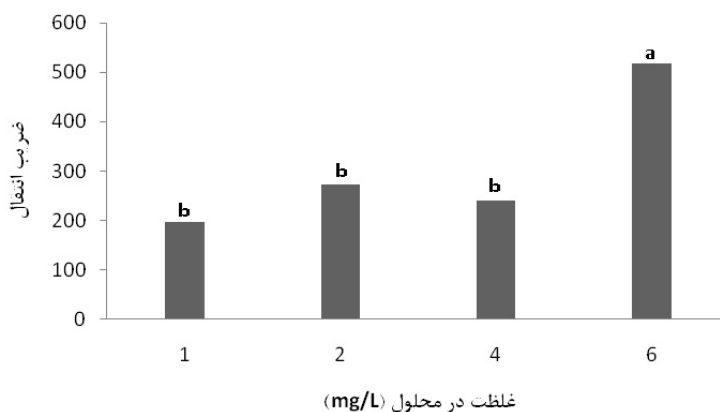
کادمیوم اثرات سمی بر سیستم‌های زیستی دارد. این عنصر در اغلب گیاهان از طریق ریشه جذب و به برگ‌ها انتقال می‌یابد، و با اثر بر فتوسنتز و جذب عناصر کم‌مصرف، رشد را کاهش می‌دهد (۱۱). مقدار کل کادمیوم در گیاه با افزایش غلظت اولیه در

سطح آلودگی ۴ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم مشاهده شده است (شکل ۲). مارین و ارون در سال ۲۰۰۷ و خلف و زردائونی در سال ۲۰۰۹ نیز به ترتیب نتایج مشابهی در پالایش بر و روی (۱۷ و ۱۹) به کمک عدسک آبی (*Lemna gibba*) از محیط آبی به دست آوردند.

جدول ۲. مقایسه غلظت نهایی کادمیوم در گیاه با غلظت اولیه آن در پساب شبیه سازی شده

۱	۲	۴	۶	غلظت اولیه کادمیوم در پساب شبیه سازی شده (میلی گرم در لیتر)
۱۹۷/۹۹ ^d	۵۴۶/۰۸ ^c	۹۶۲/۱۸ ^a	۳۱۰۶/۹ ^b	غلظت نهایی کادمیوم در گیاه (میلی گرم در کیلوگرم)
۱/۵۳۱۴ ^d	۳/۲۴۳ ^c	۶/۵۷۸ ^b	۹/۳۶ ^a	شاخص جذب کادمیوم در گیاه (میلی گرم)

(حروف لاتین براساس آزمون LSD نشانه‌ی اختلافات معنی دار بین میانگین‌ها در سطح ۰.۵٪ می‌باشند)



شکل ۳: تغییرات ضریب انتقال کادمیوم در برابر غلظت اولیه‌ی آن در محلول کشت عدسک آبی (حروف لاتین براساس آزمون LSD نشانه‌ی اختلافات معنی دار بین میانگین‌ها در سطح ۰.۵٪ می‌باشند)

نسبتاً افزایشی داشته است.

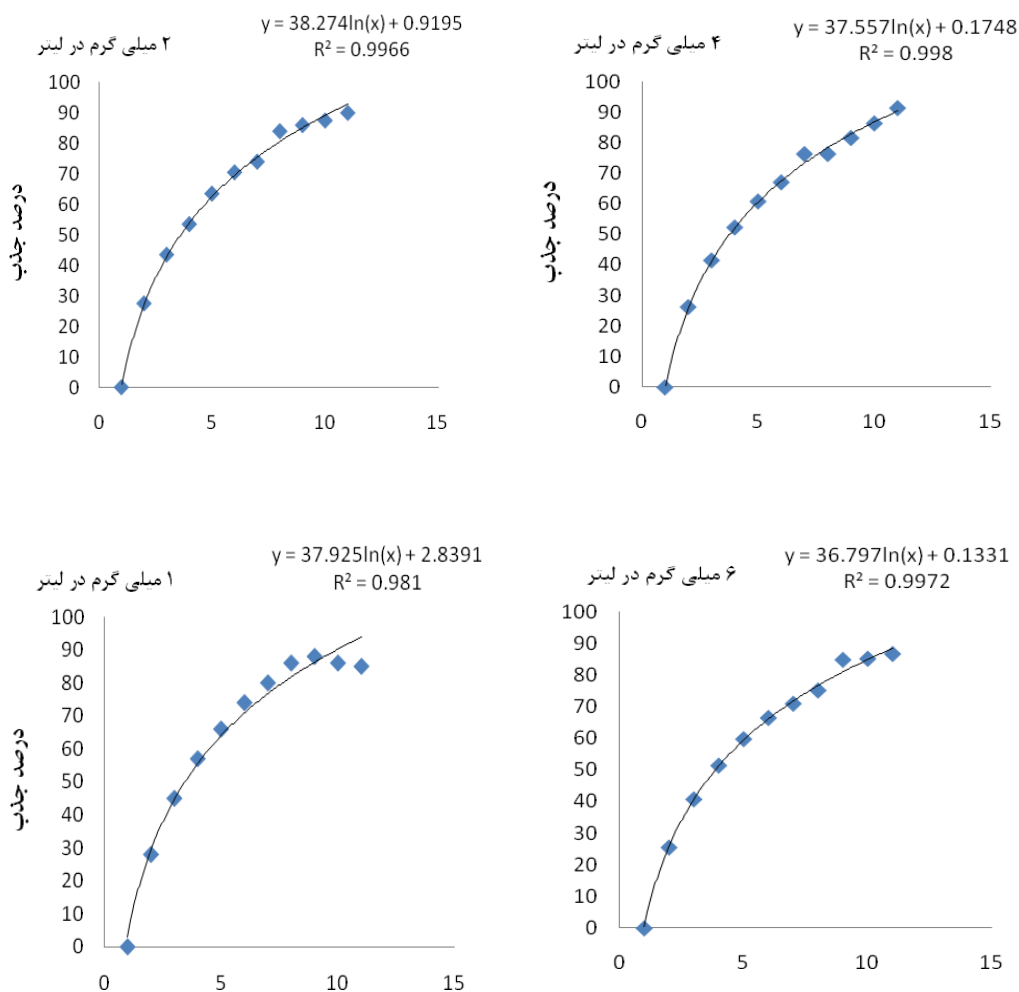
شاخص جذب

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، شاخص جذب با افزایش غلظت کادمیوم در پساب شبیه‌سازی شده افزایش یافته است، که بیانگر افزایش مقدار عنصر پالایش شده با افزایش غلظت آن در محیط است. این روند بیانگر کاهش مقدار جذب ناشی از اختلال حاصل از سمیت کادمیوم در مکانیسم جذبی و کاهش سطح جذبی گیاه دانست و علت افزایش مجدد شاخص جذب را می‌توان به از دست رفتن بخشی از نفوذپذیری انتخابی غشاء سلول‌های بخش جذب‌کننده‌ی گیاه نسبت داد. خلف و زردآویی (۲۰۰۹) افزایش مقدار روی پالایش شده را با افزایش غلظت روی در محلول رشد گیاه عدسک آبی متناسب گزارش کردند. ایشان بیان داشتند حداکثر روی تجمع یافته در گیاه در

محیط افزایش می‌یابد. غلظت کادمیوم در عدسک آبی از ۱۹۷/۹۹ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاه تا ۳۱۰۶/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک آن تغییر می‌کند. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود بیشترین مربوط به غلظت اولیه ۶ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱ میلی‌گرم در لیتر است. میشر و تریپاتی در سال ۲۰۰۸ بازه‌ی نسبتاً مشابه‌ای از غلظت کادمیوم در ماده‌ی خشک گونه‌ای از عدسک آبی را گزارش کرده‌اند (۲۲).

ضریب انتقال

ضریب انتقال برای گیاهان رشد یافته در سطوح آلودگی ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر محلول کشت، به ترتیب ۱۹۷/۹۹، ۲۷۳/۰۴، ۲۴۰/۵۴ و ۵۱۷/۸۲ به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۳ نمایان است ضریب انتقال با افزایش غلظت کادمیوم در محلول روندی



شکل ۴. تغییرات روز به روز درصد جذب در ۴ سطح آلودگی

(محور افقی نمایشگر زمان (روز)، و محور عمودی نمایشگر درصد کادمیوم جذب شده توسط گیاه است)

درصد جذب روزانه کادمیوم در پساب شبیه سازی شده

حذف روزانه کادمیوم از پساب شبیه سازی شده با شاخص درصد جذب کادمیوم بیان شده است، این شاخص از تقسیم غلظت کاهش یافته روزانه کادمیوم در محلول کشت بر غلظت اولیه تیمار شده به دست می آید. از این شاخص برای نشان دادن میزان برداشت گیاهی کادمیوم از هر ۴ غلظت شبیه سازی شده پساب آلوده استفاده شده است (شکل ۴).

غلظت بیشینه ی مطالعه (۱۷/۵۷) مشاهده شده و به بیش از ۱۰ میلی گرم روی در هر گیاه رسیده است (۱۶). پرنیان و همکاران (۱۳۹۰) در پالایش نیکل توسط علف شاخی گزارش کردند شاخص جذب نیکل آن گیاه در غلظت های ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی گرم در لیتر به ترتیب ۰/۸۹، ۱/۶۸، ۳/۴۰ و ۵/۰۵ میلی گرم بوده که همین روند افزایشی را نشان داده است (۲).

جدول ۳. شاخص تولید جرم زنده گیاه عدسک آبی برای سطوح مختلف آلودگی

۱	۲	۴	۶	۰ (شاهد)	تیمار (میلی گرم کادمیوم در لیتر)
۲/۴۴	۲/۳۶	۲/۱۶	۲	۴/۷۱	تولید زیست توده گیاهی (گرم بر روز)

به ترتیب ۲/۴۴ و ۲ گرم بر روز و بیانگر کاهش رشد و کاهش تولید جرم زنده با افزایش غلظت آلودگی در محیط کشت می باشد (جدول ۳).

نتیجه گیری

گیاه پالایی با گیاه آبی عدسک آبی که از گیاهان بومی آبگیرهای جنوب ایران است، روشی مناسب برای حذف کادمیوم از محیط های آبی می باشد. طی دوره ۱۱ روزه انکوبه گذاری، عدسک آبی کارایی بالایی در پالایش پساب شبیه سازی شده داشت. راندمان جذب کادمیوم تا ۹۱٪ کادمیوم رسید. براساس نتایج، افزایش زمان انکوبه گذاری سبب کاهش میزان کادمیوم محلول می گردد و این روند تا جایی که گیاه زنده است ادامه می یابد اما با مرگ گیاه مقداری از عنصر جذب شده آزاد می گردد. عدسک آبی کادمیوم را به مقدار زیادی از محیط برداشت کرد و کارایی برداشت کادمیوم به ۹۱/۲۵٪ در سطح آلودگی ۴ میلی گرم در لیتر رسید. بیشترین ضریب انتقال و شاخص جذب کادمیوم در سطح ۶ میلی گرم در لیتر، به ترتیب ۵۱۷/۸۲ و ۹/۳۶ میلی گرم به دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار شاخص تولید جرم زنده گیاهی ۲ و ۴/۷۱ گرم بر روز، به ترتیب مربوط به سطوح آلودگی ۶ و ۰ (شاهد) میلی گرم در لیتر به دست آمد. هر چند این روش سبب پالایش کامل عنصر سنگین در کوتاه مدت نمی گردد اما مقدار آن در محیط آبی را به میزان قابل توجهی کم می کند. با توجه به ارزان بودن و کارایی بالای آن روشی مؤثر در پالایش پسابها خواهد بود.

سپاسگزاری

این پژوهش مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد علوم خاک امیر

در همه ی تیمارها با افزایش زمان مقدار جذب کل افزایش داشت و ۱۱ روز پس از شروع تیمارگذاری حداکثر درصد جذب کادمیوم حاصل شد. میشرای و تریپاتی در سال ۲۰۰۸ نیز اعلام داشتند که با افزایش زمان انکوبه گذاری محلول میزان پالایش و حذف فلزات سنگین افزایش می یابد و تجمع فلزات سنگین در گیاهان آبی با افزایش دوره ی آزمایش افزایش می یابد (۲۲). این افزایش جذب در تمامی تیمارها از الگویی لگاریتمی پیروی می کند که بیانگر کاهش مقدار خالص جذب به ازای هر روز با گذر زمان است.

همان طور که مشاهده می شود و مطابق مطالعات میشرای و تریپاتی در سال ۲۰۰۸ (۲۲)، میراندا و همکاران در سال ۲۰۰۰ (۲۰) و میرتزکی و همکاران در سال ۲۰۰۴ (۲۱)، تجمع چشمگیری در کاهش غلظت فلز سنگین رخ داده است. بازه ی راندمان پالایش کادمیوم از پساب شبیه سازی شده بین ۸۵٪ و ۹۱/۲۵٪ بود (شکل ۴).

شاخص تولید جرم زنده گیاهی

این شاخص، شاخصی است که میزان نرخ تولید زیست توده گیاه را در سطوح مختلف آلودگی مورد سنجش قرار می دهد (۱۹). به کمک این شاخص مقدار وزن تر زیست توده ی تولید شده توسط گیاهان در محیط رشد، نسبت به مقدار اولیه ی وزن تر زیست توده در طول زمان کشت گیاهان، مورد مقایسه قرار گرفت.

شاخص تولید جرم زنده برای شاهد (نمونه بدون آلودگی کادمیوم) ۴/۷۱ به دست آمد. بیشترین مقدار این شاخص در پساب آلوده به کادمیوم در سطح ۱ میلی گرم بر لیتر و کمترین آن مربوط به سطح آلودگی ۶ میلی گرم بر لیتر کادمیوم بوده است، که

امکان انجام برخی اندازه‌گیری‌ها را در آن مراکز فراهم کردند، همچنین کلیه مسئولان و متصدیان آزمایشگاه‌های آن مراکز و آزمایشگاه‌های گروه علوم خاک دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر و قدردانی را دارند.

پرنیان و هزینه‌های آن از پژوهانه‌ی استادان راهنما (مصطفی چرم و نعمت اله جعفرزاده حقیقی فرد) و مشاور طرح سرکار خانم مهری دیناروند تأمین گردیده است. نویسندگان از سرکار خانم مهری دیناروند در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اهواز و مهندس نادر حسینی زارع در سازمان آب و برق خوزستان که

منابع مورد استفاده

۱. بابایی، ی.، ف. قاسم زاده، م. ح. ارباب زوار و م. ر. علوی مقدم. ۱۳۸۶. مطالعه آزمایشگاهی حذف آرسنیک از آب آلوده توسط جلبک ماکروسکوپی «کارا»، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نهم ۲: ۱۹-۱۱.
۲. پرنیان، ا.، م. چرم، ن. جعفرزاده حقیقی فرد و م. دیناروند. ۱۳۹۰. گیاه پالایی نیکل از محیط هیدروپونیک به کمک علف شاخی (*Ceratophyllum demersum* L.)، مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، سال دوم ۶: ۸۵-۷۵.
۳. پورجعفری دهکردی، ن. ۱۳۷۹. بررسی تغییرات COD، DO و فلزات مس و کادمیوم و تعیین ارتباط فلزات سنگین با پارامترهای کیفی آب در آب رودخانه کارون، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات منطقه ۶ اهواز.
۴. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶. a. هیدروپونیک. دانشگاه صنعتی اصفهان مرکز نشر.
۵. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶. b. مبنای تغذیه گیاه، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.
۶. دباغ، ر.، ح. غفوریان، ا. باغوند، غ. ر. نبی، و ح. ریاحی. ۱۳۸۶. جذب و حذف استرونیوم پایدار و استرونیوم -۹۰ (راديواکتیو) به کمک جلبک قهوه‌ای (*Cystoseira indica*) برای رفع آلودگی‌های زیست محیطی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نهم ۲: ۱۱-۱.
۷. عرفان منش، م.، افیونی، م. ۱۳۸۱. آلودگی محیط زیست آب، خاک و هوا. چاپ دوم. نشر ارکان اصفهان.
۸. علیزاده، آ. ۱۳۸۶. مقایسه تأثیر کلات‌کننده‌های آلی، سنتزی و کمپوست در پالایش خاک‌های آلوده به عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل تحت کشت کلزا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۹. قهرمان، ا. ۱۳۷۳. کومورفیت‌های ایران (سیستماتیک گیاهی). انتشارات دانشگاه تهران، جلد چهارم.
۱۰. مهاجری، ع.، ف. معطر، و م. محمودی. ۱۳۸۶. بررسی اثر کادمیوم در بیماری‌های کلیوی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نهم ۴: ۱۱۱-۱۱۵.
۱۱. مینویی س.، د. مینایی تهرانی، ک. سمیعی و ش. فریور. ۱۳۸۷. مطالعه تغییرات ماکروسکوپی و میکروسکوپی تأثیر فلز کادمیوم بر گیاه گندمی (*Chlorophytum comosum*)، مجله زیست‌شناسی ایران، جلد ۲۱(۴): ۷۴۷-۷۳۷.
12. Abul Kashem, Md., B. R. Singh, S. M. Imamul Huq and Sh. Kawai. 2008. Cadmium phytoextraction efficiency of arum (*Colocasia antiquorum*), radish (*Raphanus sativus* L.) and water spinach (*Ipomoea aquatica*) grown in hydroponics. *Water Air Soil Pollutant* 192:273-279.
13. Aravind, P. and M. N. V. Prasad. 2005. Cadmium-Zinc interaction in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. *Journal of Plant Physiology* 17(1):3-20.

14. Ayyasamy, P.M., S. Rajakumarb, M. Sathishkumarc, K. Swaminathanc, K. Shanthid. 2009. Nitrate removal from synthetic medium and groundwater with aquatic macrophytes. *Desalination* 242: 286-296.
15. Fox, L. J., Struik, P. C., Appleton, B. L. and Rule, J. H. 2008. Nitrogen phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). *Water Air Soil Pollutant* 194:199-207.
16. Kara, Y., D. Basaran, I. Kara. 2003. Bioaccumulation of nickel by aquatic macrophyta *Lemna minor* (duckweed). *International Journal of Agriculture and Biology*, 5(3): 281-283.
17. Khellaf, N. and M. Zerdaoui. 2009. Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant, *Lemna gibba* L., *Bioresource Technology* 100: 6137-6140.
18. Lu, Q., Z. L. He, D. A. Graetz, P. J. Stoffella and X. Yang. 2010. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *Environmental Science and Pollution Reserch International* 17(1):84-96
19. Marin, D.C.C.M. and G. Oron. 2007. Boron removal by the duckweed *Lemna gibba*: A potential method for the remediation of boron-polluted waters. *Water Research* 41:4579 – 4584.
20. Miranda, G., A. Quiroz and M. Salazar. 2000. Cadmium and lead removal from water by the duckweed *Lemna gibba* L. (Lemnaceae). *Hidrobiologica* 10(1):7-12.
21. Miretzky P., A. Saralegui and A. F. Cirelli. 2004. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). *Chemosphere* 57:997-1005.
22. Mishra, V. K. and B.D. Ttipathy. 2008. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes, *Bioresource Technology* 99:7091-7097.
23. Olguin, E. J., D. Rodriguez, G. Sanchez, E. Hernandez and M. E. Ramirez. 2003. Productivity, protein content and nutrient removal from anaerobic effluents of coffee wastewater in *Salvinia minima* ponds, under subtropical conditions. *Acta Biotechnologica* 23:259-270.
24. Pivetz, B. E. 2001. Phytoremediation of contaminated soil and groundwater at hazardous waste sites. in ground water issue. EPA/540/S-01/500. pp. 1-36.
25. Polomski, R. F., M. D. Taylor, D. G. Bielenberg, W. C. Bridges, S. J. Klaine and T. Whitwell. 2009. Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhouse-based laboratory-scale subsurface constructed wetlands. *Water Air Soil Pollutant* 197:223-232.
26. Saygideger S., M. Dogan and G. Keser. 2004. Effect of lead and pH on lead uptake, chlorophyll and nitrogen content of *Typha latifolia* L. and *Ceratophyllum demersum* L. *International J. of Agric. and Biol.* 6(1):168-172.
27. Schröder, P., J. Navarro-Aviñó, H. Azaizeh, A. G. Goldhirsh, S. DiGregorio, T. Komives, G. Langergraber, A. Lenz, E. Maestri, A. R. Memon, A. Ranalli, L. Sebastiani, S. Smrcek, T. Vanek, S. Vuilleumier and F. Wissing. 2007. Using phytoremediation technologies to upgrade waste water treatment in europe. *Environ. Sci. and Pollution Res. Int.* 14(7):490-497.
28. Srivastava, J., A. Gupta, and H. Chandra. 2008. Managing water quality with aquatic macrophytes. *Environmental Science Biotechnology* 7:255-266.
29. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. APHA. Washington DC. 2005.
30. Ye, Z. H., A. J. M. Baker, M. H. Wong and A. J. Willis. 2003. Copper tolerance, uptake and accumulation by *Phragmites australis*. *Chemosphere* 50:795-800.