حذف زیستی کادمیوم به‌وسیله عدسک‌آبی (پتانسیل‌یابی پالایش سبزآب و پساب)

امیر پرنیان[۱*]، مصطفی چرم[۱]، نعمت اله جعفرزاده حقیقی فرد[۲،۳]، 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 وگاهی سمیت منابع آب می‌گردد. با افزایش جمعیت و نیاز به‌منابع آب بیشتر، هم‌چنین افزایش آلوده‌شدن این منابع آبی ارزشمند، نیاز شدیدی به روش‌های نو و ارزان برای پالایش و بهبود کیفیت آب‌ها احساس می‌شود. گیاه‌پالایی با گیاهان آبزی روشی مؤثر و ارزان برای بهبود کیفیت آب و پساب‌هاست. هدف از این مطالعه پتانسیل‌یابی حذف زیستی کادمیوم به‌وسیله 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 به‌مقدار 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 به‌دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار شاخص تولید جرم زنده گیاهی ۲ و ۴/۷۱ گرم در روز، به‌ترتیب مربوط به سطوح آلودگی ۶ و ۰ (شاهد) میلی‌گرم در لیتر بود. پالایش زیستی کادمیوم به کمک عدسک‌آبی 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: گیاه‌پالایی پساب؛کادمیوم ؛ عدسک‌آبی؛ گیاهان آبزی

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 زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

مقدمه

منابع آبی محدودی در دسترس انسان است. عمده‌ی منابع مورد مصرف انسان دریاچه‌ها، رودها، رطوبت خاک و آب زیرمینی 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 این‌روش‌ها 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 درصنعت 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، باتری سازی، کودسازی، معدن کاوی 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 غذائی 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 می شود (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 ازجمله 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 آبزی (گونه‌هایی مانند: *Eichhornia crassipes* و واریته‌هایی 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). یی و همکاران در بررسی ۵ جمعیت گونه‌ای از گیاه آبزی 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 کارا از آب آلوده با راندمان ۷۵٪ طی ۱۹ روز

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

پالایش کردند (۱). مطالعات بسیاری برای پالایش فلزات سنگین از محیط‌های آبی توسط عدسک و دیگر گیاهان آبزی انجام شده‌است. خلف و زردائویی (۱۷) که روی را توسط عدسک‌آبی، میرتزکی و همکاران (۲۱) سرب را توسط علف شاخی، میشرا و تریپاتی (۲۲) سه عنصر سنگین را توسط سه گیاه آبزی با فرم‌های رویشی متفاوت، آروید و پراسد (۱۳) کادمیوم را توسط علف شاخی و کارا و همکاران (۱۶) نیکل را به‌وسیله‌ی عدسک‌آبی از محیط‌های مایع جذب و حذف نمودند. درتمامی 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 به‌وسیله عدسک‌آبی (*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 ۵ ± ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد، میانگین رطوبت ٪۲۵ ± ۵۵، تشعشع کل بین $W\ m^{-2}$ ۶۵۰ تا ۱۱۰۰ وات بر مترمربع و تشعشع خالص بین ۴۰۰ تا ۱۰۵۰ وات بر مترمربع در تغییر بود.

نمونه برداری فاضلاب

برای به‌دست 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 به رود کارون، در نزدیکی پل پنجم شهر اهواز، و هم‌چنین پساب صنایع فولاد اهواز جمع آروی 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 آبزی عدسک‌آبی (*Lemna gibba* L.) برای پالایش فلز سنگین کادمیوم از محیط شبیه‌سازی شده استفاده شد. عدسک‌آبی که نوعی گیاه آبزی معلق است (۹)، از آبگیر روستای سویسه واقع در جاده‌ی اهواز- آبادان جمع آوری شد. پس از شستشو با آب شهر، در محیط گلخانه، به‌مدت 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 $Ca(NO_3)_2$، ۰/۵ میلی‌مولار $NH_4H_2PO_4$، 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

گونه‌های فلزی قابل جذب توسط گیاه است (۵).

به‌دلایل 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. بدین‌منظور گیاهان به‌مدت 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 به‌صورت سامانه‌ی آبکشت بسته (Hydroponic System) کشت شدند (۴). طی مدت کشت، pH در محلول بدون آلودگی به‌صورت روزانه، با افزودن محلول‌های ۰/۱ مولار NaOH و HCl، هم‌چنین در پساب شبیه‌سازی‌شده 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^{2+}) 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 به‌طور معلق درآن جای گرفت (۱۹). درحین 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 (Unicam 939 Germany)، براساس روش استاندارد آزمایش آب و پساب سازمان سلامت عمومی آمریکا اندازه‌گیری شد (۲۹).

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 به‌دست آید (۱۹).

تعیین شاخص تولید جرم زنده گیاهان

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

$$Pr = (FW_2 - FW_1)/\Delta t$$

(Pr) شاخص تولید جرم زنده گیاهی (گرم بر روز)، FW_1 و FW_2 وزن تر خالص گیاه (گرم) به‌ترتیب 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 به‌مدت 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 HNO_3–$HClO_4$ (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).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

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 به‌دست می‌آید. (۸ و ۱۷).

غلظت عنصر در محیط کشت / غلظت عنصر در اندام گیاهی = ضریب انتقال عنصرشاخص جذب

شاخص جذب

شاخص جذب (Uptake Index) هر عنصر از حاصلضرب مقدار وزن ماده‌ی خشک در غلظت عنصر در اندام قابل برداشت به‌دست می‌آید. شاخص جذب معیاری مناسب برای تعیین پالایش عناصر فلزی، و در واقع قوی‌ترین معیار برای تعیین پتانسیل پالایش گیاه می‌باشد (۸).

آنالیزهای آماری

این آزمایش به‌صورت گلخانه‌ای و در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام گردید و داده‌های حاصل از تیمارهای کادمیوم در غلظت‌های ۰ (شاهد)، ۱، ۲، ۴، ۶ میلی‌گرم در لیتر بود. تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از آمار توصیفی برای نمایش مقادیر جذب کادمیوم و برای مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن مقادیر جذب کادمیوم و غلظت اولیه به‌وسیله‌ی گیاه، با استفاده از نرم‌افزار 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 pHهای ۷> ۹/۵ > ۵/۵ به‌دست آمد. با توجه به این‌که رشد بیشتر نشان از تطابق بهتر و بیشتر این گیاه با pH = ۷ بود، این pH برای پالایش سبز فلز سنگین کادمیوم توسط عدسک‌آبی در نظر گرفته شد.

پژوهش‌های بسیاری بر روی گیاهان آبزی برای به‌دست آوردن pH بهینه‌ی جذب عناصر هم‌چنین تعیین pH بهینه‌ی پالایش سبز عناصر کمیاب صورت گرفته است. بسته به جنس، گونه و نژادهای بومی هر منطقه گیاهان مورد بررسی نتایج متفاوتی به‌دست آمده‌است. از آن جمله می‌توان به سیجیدجر و همکاران در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد که pH بهینه‌ی جذب سرب را برای ۲ گیاه آبزی (*Typha latifolia* L. و *Ceratophyllum demersum* L.) به‌ترتیب ۹ و ۷ به‌دست آوردند (۲۶).

تغییرات غلظت روزانه کادمیوم در پساب شبیه‌سازی شده

غلظت کادمیوم پساب شبیه‌سازی شده طی دوره‌ی تیمارگذاری ۱۱ روزه به‌طور روزانه اندازه‌گیری شد، که بیانگر روند کاهشی مقدار کادمیوم در محلول کشت بود. این کاهش با توجه به بسته بودن سیستم کشت نشانه‌ی حذف کادمیوم از محیط محلول و پالایش پساب شبیه‌سازی بود.

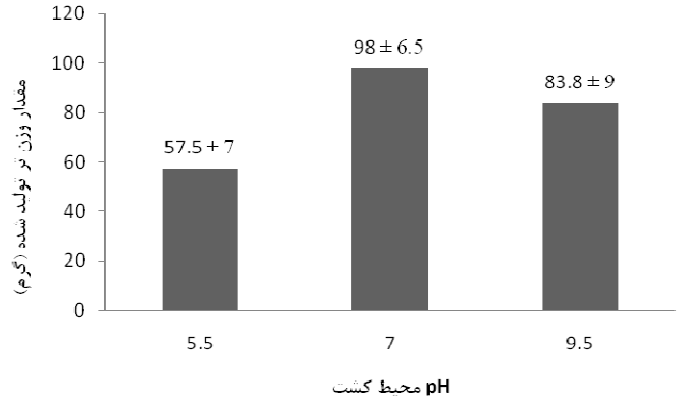
در شکل ۲ روند کلی تغییرات ۱۱ روزه‌ی غلظت کادمیوم در محلول کشت آلوده ارائه شده‌است؛ در این شکل می‌توان کاهش غلظت کادمیوم را در هر ۴ سطح آلودگی مشاهده کرد، که نشان از جذب کادمیوم به‌وسیله‌ی گیاه عدسک‌آبی است. در تمامی سطوح آلودگی کادمیوم کاهش چشمگیری رخ داده است. این تغییرات در همه‌ی موارد از روند کاهشی و لگاریتمی تبعیت می‌کند.

R^2 = ۰/۹۹۷۲ C = -۲/۲۰۸ln (T) + ۵/۹۹۲

غلظت نهایی کادمیوم در هر یک از تیمارها در جدول ۱ نشان داده شده‌است. این جدول کاهش ۸۵، ۹۰، ۹۱/۲۵ و ۸۶/۵ درصدی کادمیوم به‌ترتیب در سطوح ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر آلودگی را نشان می‌دهد که بیشترین راندمان جذب در

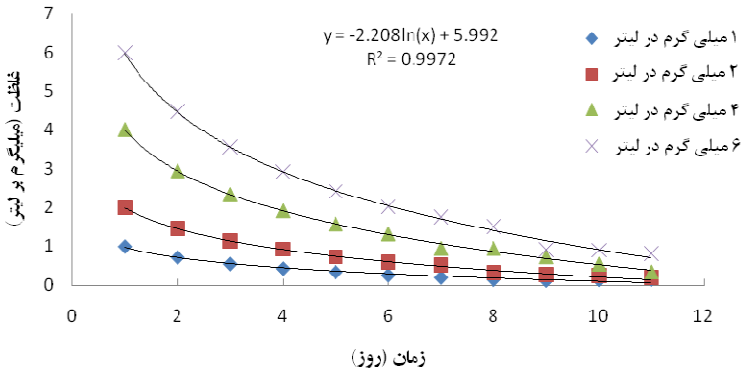
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]



شکل ۱. pH بهینه برای رشد گیاه و پالایش پساب

(اعداد میانگین وزن تر تولیدشده ± انحراف معیار و n = ۳ می‌باشند)



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

غلظت اولیه کادمیوم در پساب شبیه سازی شده (میلی‌گرم در لیتر)	٦	۴	۲	۱
غلظت نهایی کادمیوم در پساب شبیه‌سازی شده (میلی‌گرم در لیتر)	۰/۸۱	۰/۳۵	۰/۲	۰/۱۵
درصد جذب ۱۱ روزه کادمیوم	۸۶/۵^{a}	۹۱/۲۵^{a}	۹۰^{a}	۸۵^{a}

(حروف لاتین براساس آزمون LSD نشانه‌ی اختلافات معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح ۵٪ می‌باشند)

سطح آلودگی ۴ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم مشاهده شده‌است (شکل ۲).

مارین و ارون در سال ۲۰۰۷ و خلف و زردائونی در سال ۲۰۰۹ نیز به‌ترتیب نتایج مشابهی در پالایش بر و روی (۱۹ و ۱۷) به کمک عدسک‌آبی (*Lemna gibba*) از محیط آبی به‌دست آوردند.

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

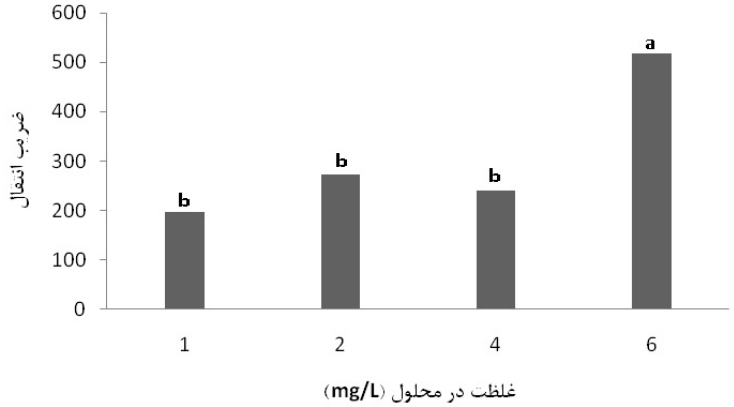
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

جدول ۲. مقایسه غلظت نهایی کادمیوم در گیاه با غلظت اولیه آن در پساب شبیه‌سازی‌شده

غلظت اولیه کادمیوم در پساب شبیه‌سازی شده (میلی‌گرم در لیتر)	٦	۴	۲	۱
غلظت نهایی کادمیوم در گیاه (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۳۱۰۶/۹ [b]	۹۶۲/۱۸ [a]	۵۴۶/۰۸ [c]	۱۹۷/۹۹ [d]
شاخص جذب کادمیوم در گیاه (میلی‌گرم)	۹/۳٦ [a]	٦/۵۷۸ [b]	۳/۲۴۳ [c]	۱/۵۳۱۴ [d]

(حروف لاتین براساس آزمون LSD نشانه‌ی احتلافات معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح ۵٪ می‌باشند)



شکل ۳: تغییرات ضریب انتقال کادمیوم در برابر غلظت اولیه‌ی آن در محلول کشت عدسک‌آبی
(حروف لاتین براساس آزمون LSD نشانه‌ی احتلافات معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح ۵٪ می‌باشند)

محیط افزایش می‌یابد. غلظت کادمیوم در عدسک‌آبی 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. میشرا و تریپاتی در سال ۲۰۰۸ بازه‌ی نسبتاً مشابه‌ای از غلظت کادمیوم در ماده‌ی خشک گونه‌ای از عدسک‌آبی را گزارش کرده‌اند (۲۲).

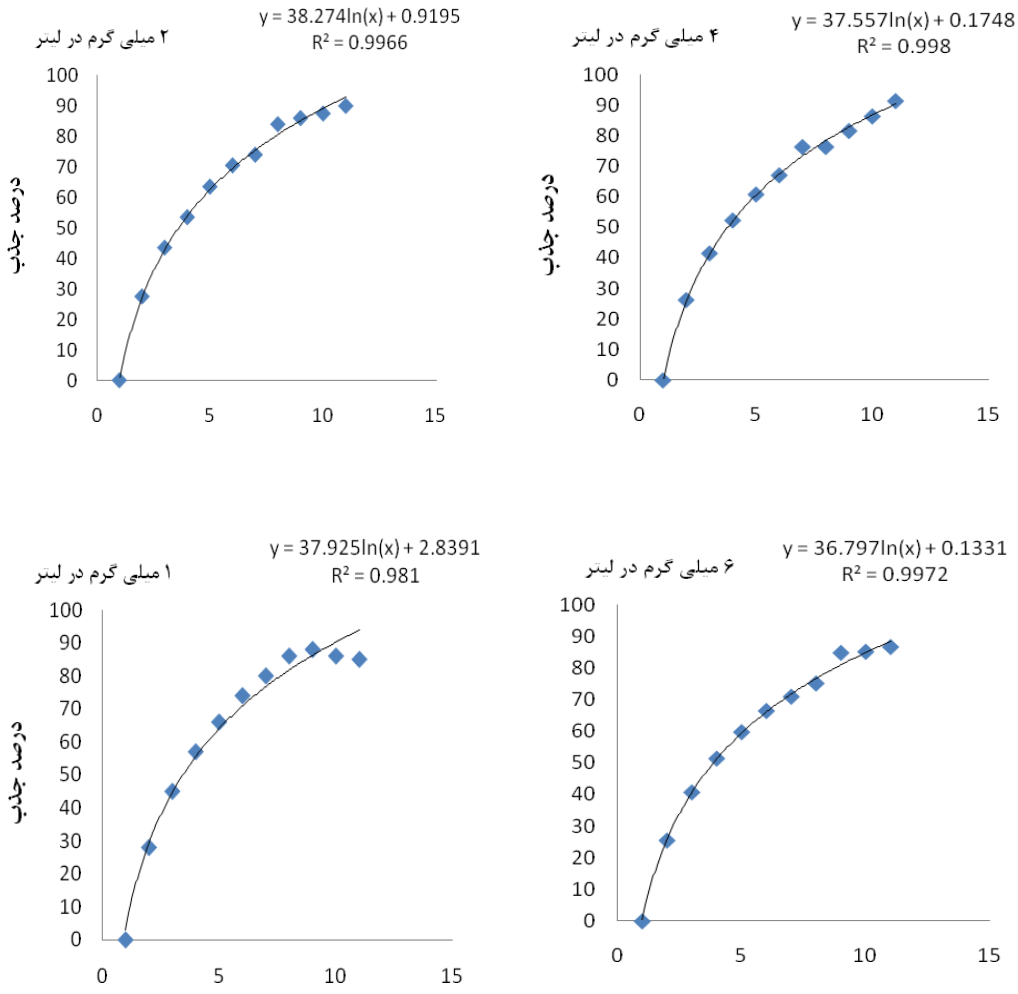
ضریب انتقال

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

شاخص جذب

همان‌طورکه در جدول ۲ نشان داده شده‌است، شاخص جذب با افزایش غلظت کادمیوم در پساب شبیه‌سازی‌شده افزایش یافته‌است، که بیان‌گر افزایش مقدار عنصر پالایش‌شده 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 زردائویی (۲۰۰۹) افزایش مقدار روی پالایش‌شده را با افزایش غلظت روی در محلول رشد گیاه عدسک‌آبی متناسب گزارش کردند. ایشان بیان داشتند حداکثر روی تجمع یافته در گیاه در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]



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

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

غلظت بیشینه‌ی مطالعه (۱۷/۵۷) مشاهده شده و به بیش از ۱۰ میلی‌گرم روی در هر گیاه رسیده‌است (۱۶). پرنیان و همکاران (۱۳۹۰) در پالایش نیکل توسط علف شاخی گزارش کردند شاخص جذب نیکل آن گیاه در غلظت‌های ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب ۰/۸۹، ۱/۶۸، ۳/۴۰ و ۵/۰۵ میلی‌گرم بوده که همین روند افزایشی را نشان داده‌است (۲).

درصد جذب روزانه کادمیوم در پساب شبیه‌سازی‌شده

حذف روزانه کادمیوم از پساب شبیه‌سازی‌شده با شاخص درصد جذب کادمیوم بیان شده‌است، این شاخص از تقسیم غلظت کاهش‌یافته روزانه کادمیوم در محلول کشت بر غلظت اولیه تیمار شده به‌دست می‌آید. از این شاخص برای نشان دادن میزان برداشت گیاهی کادمیوم از هر ۴ غلظت شبیه‌سازی‌شده پساب آلوده استفاده شده‌است (شکل ۴).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

جدول ۳. شاخص تولید جرم زنده‌ی گیاه عدسک‌آبی برای سطوح مختلف آلودگی

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

در همه‌ی تیمارها با افزایش زمان مقدار جذب کل افزایش داشت و ۱۱ روز پس از شروع تیمارگذاری حداکثر درصد جذب کادمیوم حاصل شد. میشرا و تریپاتی در سال ۲۰۰۸ نیز اعلام داشتند که با افزایش زمان انکوبه‌گذاری محلول میزان پالایش و حذف فلزات سنگین افزایش می‌یابد و تجمع فلزات سنگین در گیاهان آبزی با افزایش دوره‌ی آزمایش افزایش می‌یابد (۲۲). این افزایش جذب در تمامی تیمارها از الگویی لگاریتمی پیروی می‌کند که بیانگر کاهش مقدار خالص جذب به ازای هر روز با گذر زمان است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود و مطابق مطالعات میشرا 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 داده‌است. بازه‌ی راندمان پالایش کادمیوم از پساب شبیه‌سازی‌شده بین ۸۵٪ و ۹۱/۲۵٪ بود (شکل ۴).

شاخص تولید جرم زنده‌ی گیاهی

این شاخص، شاخصی است که میزان نرخ تولید زیست توده گیاه را در سطوح مختلف آلودگی مورد سنجش قرار می‌دهد (۱۹). به کمک این شاخص مقدار وزن تر زیست توده‌ی تولیدشده توسط گیاهان در محیط رشد، نسبت به مقدار اولیه‌ی 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 به‌دست آمد. بیشترین مقدار این شاخص در پساب آلوده به کادمیوم در سطح ۱ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین آن مربوط به سطح آلودگی ۶ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم بوده است، که به‌ترتیب ۲/۴۴ و ۲ گرم بر روز و بیانگر کاهش رشد و کاهش تولید جرم زنده با افزایش غلظت آلودگی در محیط کشت می‌باشد (جدول ۳).

نتیجه‌گیری

گیاه‌پالایی با گیاه آبزی عدسک‌آبی که از گیاهان بومی آبگیرهای جنوب ایران است، روشی مناسب برای حذف کادمیوم از محیط‌های آبی می‌باشد. طی دوره ۱۱ روزه انکوبه‌گذاری، عدسک‌آبی کارایی بالایی در پالاش پساب شبیه‌سازی‌شده داشت. راندمان جذب کادمیوم تا ۹۱٪ کادمیوم رسید. براساس نتایج، افزایش زمان انکوبه‌گذاری سبب کاهش میزان کادمیوم محلول می‌گردد و این روند تا جایی که گیاه زنده است ادامه می‌یابد اما با مرگ گیاه مقداری از عنصر جذب‌شده آزاد می‌گردد. عدسک‌آبی کادمیوم را به‌مقدار زیادی از محیط برداشت کرد و کارایی برداشت کادمیوم به ۹۱/۲۵٪ در سطح آلودگی ۴ میلی‌گرم در لیتر رسید. بیشترین ضریب انتقال و شاخص جذب کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم در لیتر، به‌ترتیب ۵۱۷/۸۲ و ۹/۳۶ میلی‌گرم به‌دست آمد. کمترین و بیشترین مقدارشاخص تولید جرم زنده گیاهی۲ و ۴/۷۱ گرم بر روز، به‌ترتیب مربوط به سطوح آلودگی ۶ و ۰ (شاهد) میلی‌گرم در لیتر به‌دست آمد. هر چند این روش سبب پالایش کامل عنصر سنگین در کوتاه‌مدت نمی‌گردد اما مقدار آن در محیط آبی را به‌میزان قابل توجهی کم می‌کند. با توجه به ارزان بودن و کارایی بالای آن روشی مؤثر در پالایش پساب‌ها خواهد بود.

سپاسگزاری

این پژوهش مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد علوم خاک امیر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

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 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.

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 DO، COD و فلزات مس و کادمیوم و تعیین ارتباط فلزات سنگین با پارامترهای کیفی آب در آب رودخانه کارون، پایانامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات منطقه ۶ اهواز.

۴. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸٦.a . هیدروپونیک.دانشگاه صنعتی اصفهان مرکز نشر.

۵. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸٦.b . مبانی تغذیه گیاه، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.

۶. دباغ، ر.، ح. غفوریان، ا. باغوند، غ. ر. نبی، و ح. ریاحی. ۱۳۸۶. جذب و حذف استرونسیوم پایدار و استرونسیوم ۹۰- (رادیواکتیو) به کمک جلبک قهوه‌ای (*Cystoseira indica*) برای رفع آلودگی های 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 کلات کننده‌های آلی، سنتزی و کمپوست در پالایش خاک‌های آلوده به عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل تحت کشت کلزا، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۹. قهرمان، ا. ۱۳۷۳. کورمورفیت‌های 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: ۱۱۵-۱۱۱.

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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]

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). Hidrobioligica 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-02-17]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.25.4]