گیاه‌پالایی نیکل از محیط هیدروپونیک به کمک علف شاخی (*Ceratophyllum demersum* L.)

امیر پرنیان[۱*]، مصطفی چرم[۱]، نعمت‌اله جعفرزاده حقیقی فرد[۲] و مهری دیناروند[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۳/۳۰)

چکیده

با افزایش جمعیت، روند آلوده شدن منابع آب تشدید شده و بشر نیازمند روش‌هایی نو و ارزان برای پالایش و بهبود کیفیت آب شده است. نیکل از عناصری است که در غلظت‌های کم برای ادامه حیات اکوسیستم‌ها ضروری است و در غلظت‌های زیاد مضر و آلاینده‌ای خطرناک به شمار می‌رود. این فلز از طریق منابع مختلف، از جمله پساب‌ها و فاضلاب‌های شهری و صنعتی سبب آلودگی منابع آب می‌گردد. پالایش سبز با گیاهان آبزی روشی نو، کارآمد و ارزان برای بهبود کیفیت آب و پساب است. در این پژوهش، پتانسیل گیاه‌پالایی نیکل به وسیله گیاه آبزی علف شاخی (*Ceratophyllum demersum* L.) که بومی بسیاری از رودخانه‌های ایران است، در محیط هیدروپونیک بررسی شده است. پس از تعیین pH بهینه رشد (pH = ۷)، این گیاه در محلول غذایی هوگلند دارای نیکل در ۴ سطح مختلف آلودگی (صفر، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم در لیتر) طی ۱۴ روز کشت شد. با اندازه‌گیری روزانه غلظت نیکل در محلول کشت، و هم‌چنین مقدار اولیه و نهایی این فلز سنگین در گیاه، گیاه‌استخراجی نیکل از پساب امکان‌سنجی شد و اثرات زیستی نیکل بر رشد علف شاخی با محاسبه شاخص تولید زیست‌توده بررسی گردید. حداکثر کارایی حذف نیکل ۵۰٪ و در سطح آلودگی ۱ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. ضریب انتقال و شاخص جذب حداکثری نیکل در سطح ۶ میلی گرم در لیتر، ۳۳۸/۶۵ و ۵/۰۵ میلی‌گرم به دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار شاخص تولید زیست‌توده گیاهی ۱/۲۷ و ۳/۶ گرم در روز، به ترتیب مربوط به سطوح آلودگی ۶ و صفر میلی‌گرم در لیتر بود. نتیجه کلی پژوهش این بود که پالایش سبز نیکل در محیط هیدروپونیک به وسیله گیاه علف شاخی امکان‌پذیر است و بررسی پتانسیل آن در مورد پساب‌های صنعتی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نیکل، گیاه‌پالایی، گیاهان آبزی، آلودگی منابع آب

مقدمه

آلودگی منابع آب به عناصر سنگین، ناشی از منابع مختلف، یک مشکل زیست‌محیطی مهم است (۱۳). نیکل از فلزات سنگین بوده و در غلظت‌های کم برای ادامه حیات گیاهان و هم‌چنین بقا و پایداری اکوسیستم‌ها ضروری است. اما این عنصر در غلظت‌های زیاد مضر و آلاینده‌ای خطرناک به شمار می‌رود (۵). فلزات سنگینی مانند مس، نیکل و کبالت میل ترکیبی شدیدی با گروه‌های آهن سولفیدریل (SH) دارند و آنزیم‌ها را متلاشی کرده

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار علوم خاک، دانشگاه دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲. استاد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز.

۳. کارشناس ارشد گیاه‌شناسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اهواز.

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amir.parnain86@gmail.com

و قدرت آنزیمی آنها را از بین می‌برند. این فلزات قابلیت تجمع در بافت‌های حیوانی و گیاهی را نیز دارند (۳). نیکل در غلظت‌های کم باعث سردرد، سرگیجه، حالت تهوع، سرفه‌های خشک و سخت می‌شود و در غلظت‌های زیاد می‌تواند باعث بروز سرطان‌های ریه، مجاری تنفسی و استخوان گردد (۹). صنایعی چون خودروسازی، پرداخت فلزات، آبکاری، باتری‌سازی، استخراج معدن، کابل سازی، دباغی، نساجی و فولاد، فلزات سنگینی همچون نیکل، کادمیم و مس را به میزان زیاد به همراه پساب خروجی وارد محیط می‌کنند (۱۳). نیکل یکی از ترکیبات کاتالیستی مورد استفاده در صنایع پتروشیمی است (۳). یون نیکل دو ظرفیتی با غلظت‌های مختلف در فاضلاب خام صنایعی مانند آبکاری و فلزات غیر آهنی یافت می‌شود. بر اساس استاندارد مقررات ملی زیست‌محیطی ایران، حداکثر غلظت قابل قبول برای فلز نیکل در پساب خروجی صنایع ۲ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (۹).

منابع آب محدودی در دسترس انسان است. عمده منابع آب شیرین مصرفی انسان دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی است. آب تالاب‌ها و رودها تحت تأثیر فعالیت‌های شدید و عملکردهای نادرست انسان، با ورود رسوب، پساب‌های کشاورزی، فاضلاب‌ها و پساب‌های مختلف دچار آلودگی شده‌اند. این نیاز شدیداً احساس می‌شود که باید با روش‌هایی مؤثر و ارزان، اثر نامطلوب این فاضلاب‌ها و پساب‌ها را بر کیفیت آب کاهش داد (۲). در همین راستا، روش‌های اسمز معکوس، تبادل یونی، سیستم‌های بیوراکتوری با غشاء تبادل یونی، احیاء کاتالیتیک و دیگر روش‌های مبتنی بر فرایندهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی را می‌توان نام برد (۹ و ۱۲).

گیاه‌پالایی که روشی مؤثر در حفظ کیفیت منابع آب است (۱۴) به صورت‌های مختلف انجام می‌شود. گیاه‌استخراجی (Phytoextraction) یکی از روش‌های گیاه‌پالایی است که در آن آلاینده‌های معدنی آب و خاک به اندام‌های هوایی گیاه منتقل و انباشت می‌شوند که پس از آن برداشت، بازیافت، سوزانده و یا دفن می‌گردند (۱۰). گیاه‌پالایی محیط‌های آبی با گیاهان آبزی (استفاده از 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 ریزمغذی‌ها از پساب‌ها و آب‌های آلوده است (۱۴، ۲۴ و ۲۷). کاهوی آبی دارای پتانسیل بالایی برای پالایش نیتروژن و فسفر، کاستن سوسپانسیون‌های جامد آب و گل‌آلودگی از سیلاب‌ها و افزایش کیفیت آب است (۱۸). یی و همکاران (۲۹) در بررسی ۵ جمعیت گونه‌ای از گیاه آبزی فرگمایتس در دو معدن، میزان 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. دباغ و همکاران (۶) با استفاده از زیست‌توده خشک جلبک قهوه‌ای، استرانسیوم پایدار و استرانسیوم- ۹۰ را از محیط آب با موفقیت جذب و حذف نمودند. بابایی و همکاران (۱) آرسنیک را توسط جلبک ماکروسکوپی کاراً از آب آلوده با راندمان ۷۵٪ طی ۱۹ روز پالایش کردند (۱). کارا و همکاران (۱۵) در ۳ روز کشت عدسک آبی (*Lemna minor*) و بررسی اثرات نیکل بر آن، جذب نیکل را توسط این گیاه بسیار خوب توصیف کردند.

گیاه علف شاخی که به نام چنگال آبی (*Ceratophyllum demersum* L.) هم شناخته می‌شود و از گیاهان آبزی مهم و غالب رودخانه‌ها و کانال‌های ایران است (۸)، از راسته نیمفیلز (Nymphaels) و خانواده سراتوفیلاسه (Ceratophyllaceae) می‌باشد که در آب‌های کم عمق، گل آلود، تیره و کم سرعت در شدت‌های کم نور می‌روید (۱۱). این گیاه می‌تواند فیلتر زیستی مناسبی برای انواع مختلفی از فلزات سنگین باشد. مطالعات بسیاری برای پالایش فلزات سنگین از محیط‌های آب توسط علف شاخی و دیگر گیاهان آبزی انجام شده که همگی کاهش چشمگیر غلظت فلزات سنگین را گزارش کرده‌اند (۱۱، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۵ و ۲۶). اما مطالعات اندکی برای پالایش نیکل توسط این جنس از علف شاخی در دسترس می‌باشد. هدف این پژوهش، بررسی گیاه‌پالایی نیکل در محیط هیدروپونیک

جدول ۱ . ویژگی‌های پساب پایش شده

متغییر اندازه‌گیر شده	pH	EC (ds/m)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)
محدوده میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده	۷/۱ تا ۷/۷	۳/۸ تا ۴/۳	۰/۱۵ تا ۳/۴	۰/۰۵ تا ۱/۸

به کمک علف شاخی (*Ceratophyllum demersum* L.) بود.

مواد و روش‌ها

محل آزمایش

آزمایش‌های این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده 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 درجه سلسیوس، میانگین رطوبت ۲۵ ± ۵۵٪، تشعشع کل بین ۶۵۰ تا ۱۱۰۰ وات بر متر مربع و تشعشع خالص بین ۴۰۰ تا ۱۰۵۰ وات بر متر مربع در تغییر بود.

نمونه برداری فاضلاب

برای به دست آوردن تخمینی از مقدار آلودگی و تهیه غلظت‌های نیکل برای آزمایش‌های نهایی پالایش و حذف زیستی نیکل، نمونه‌هایی از فاضلاب آلوده 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 آوری گردید (جدول ۱). غلظت فلزات سنگین این نمونه‌ها بر اساس روش استاندارد برای آزمایش آب و پساب سازمان سلامت عمومی آمریکا اندازه‌گیری شد (۲۸).

جمع‌آوری، کشت، تطبیق، تکثیر و آماده‌سازی گیاهان

گیاهان از نهرهای آبیاری دانشگاه شهید چمران اهواز جمع‌آوری شدند. گیاهان پس از شستشو با آب شهر، در محیط گلخانه، به مدت ۴ هفته در گلخانه در ظروف ۳۵ لیتری مسطح حاوی محلول نیم غلظت هوگلند تحت شرایط کنترل شده دما و رطوبت برای تطبیق با محیط کشت، نگه‌داری شدند تا رشد، تطبیق و تکثیر یافته و آماده کشت آزمایشی گردند.

ایجاد محیط کشت آزمایشی و تعیین pH بهینه

گیاهان با توجه به خاستگاه ژنتیکی و تکاملی خود در محیط‌هایی با شرایط اقلیمی، فیزیکی و شیمیایی مختلف رشد می‌کنند و طی تکامل و انتخاب طبیعی در مکان‌های اکولوژیک مختلفی پراکنده، تکثیر و تطبیق پیدا کرده‌اند. یکی از این شرایط محیطی مهم و مؤثر در رشد و نمو گیاه، pH است. pH عامل مؤثری در جذب، افزایش یا کاهش غلظت گونه‌های فلزی قابل جذب توسط گیاه است (۵).

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 به جذب حداکثر آلاینده دست یافت تا پالایش پساب با کارایی بیشتری انجام شود. 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 به صورت سیستم آبکشت بسته (Hydroponic system) کشت شدند (خوشگفتارمنش، ۱۳۸۶– الف). طی این مدت، به صورت روزانه، pH محیط کشت با افزودن محلول‌های ۰/۱ مولار NaOH و HCl در سطوح مورد نظر، و هم‌چنین سطح محلول کشت که در اثر تبخیر و تعرق دائماً کاهش می‌یافت با افزودن آب مقطر تنظیم شد. هوادهی نیز بی‌وقفه توسط سه پمپ آکواریم کوچک انجام شد (۱۰).

کشت آزمایشی در محیط مصنوعی

بر پایه سیستم هیدروپونیک در محیط گلخانه، کشت ۱۴ روزه گیاهان در ظروفی پلاستیکی حاوی ۱/۸ لیتر محلول غذایی نیم غلظت هوگلند (خوشگفتارمنش، ۱۳۸۶- الف)، با ۳ تکرار نیکل (Ni^{2+}) در غلظت‌های صفر، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر انجام شد. مقدار ۱۲ گرم از گیاهان پس از شستشو با آب دیونیزه به ظروف کشت انتقال یافت و نشاها به طور معلق در آنها جای گرفت (۱۹).

حین دوره رشد، pH به طور روزانه در محیط کشت با استفاده از محلول‌های NaOH و HCl در حدود ۷/۰ تنظیم گردید و برای آنالیز مقدار نیکل جذب شده، از محلول نمونه برداری شد. ضمناً 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 به ظروف آبکشت انجام گردید (۴ و ۱۹).

آنالیزهای آب

پس از اندازه‌گیری pH و EC و تصفیه پساب با کاغذ صافی، مقدار عنصر نیکل با دستگاه جذب اتمی و بر اساس روش استاندارد آزمایش آب و پساب سازمان سلامت عمومی آمریکا اندازه‌گیری‌شد (۲۸).

تعیین وزن تر گیاهان

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

تعیین شاخص تولید زیست‌توده گیاهان

شاخص تولید زیست‌توده گیاهی (Biomass production, Pr) به روش زیر محاسبه گردید:

$$Pr = (FW_2 - FW_1)/\Delta t \qquad [1]$$

که FW_1 و FW_2 وزن تر خالص گیاه (گرم) در زمان‌های ۱ و ۲ (روز) و Δt اختلاف بین زمان‌های ۱ و ۲ است (۱۹).

تعیین وزن خشک گیاهان

نمونه‌های گیاه با آب دیونیزه شستشو و در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت حرارت داده شدند تا کاملاً خشک و سپس با ترازو توزین شدند (۱۰).

آنالیز نمونه‌های گیاه

نمونه‌های گیاه با آب دیونیزه شستشو، در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک و به طور کامل خرد شدند. مقدار ۰/۵ گرم از هر نمونه را در بوته‌چینی با ۱۵ میلی‌لیتر HNO_3– $HClO_4$ (۱:۳ حجمی) مخلوط و در دمای اتاق تا یک شب به حال خود باقی گذاشته شدند. سپس دما به ۱۴۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس رسانده شد تا هضم کامل گردد. محلول هضم شده برای عناصر میکرو توسط دستگاه‌های جذب اتمی (Unicam 939 Germany و Varian-Liberty II, ICP-OES) بررسی گردید (۱۰).

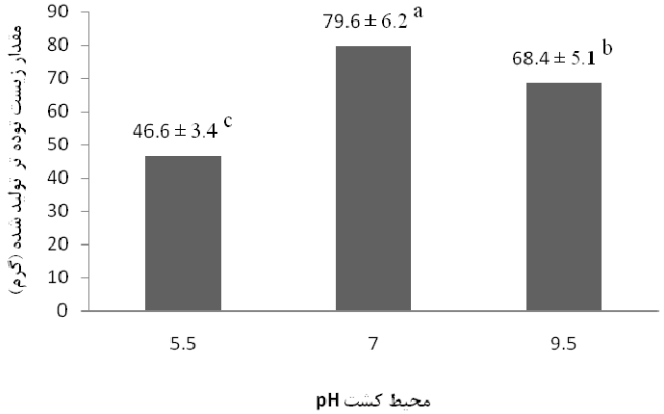
آنالیزهای آماری

این آزمایش به صورت گلخانه‌ای و در قالب یک طرح کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای نیکل شامل غلظت‌های ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم در لیتر بود. تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از آمار توصیفی برای نمایش مقادیر جذب Ni و نیز آمار تحلیلی برای تعیین اختلاف معنی‌دار آماری در مقادیر جذب Ni و غلظت اولیه به وسیله گیاه، با استفاده از نرم‌افزارهای آماری Excel 2007 و SPSS 16 صورت گرفت.

نتایج و بحث

pH بهینه برای رشد گیاه و پالایش پساب

مطابق شکل ۱، بیشترین رشد (۷۹/۶ گرم وزن تر) مربوط به pH = ۷ بوده است. روند وزن تر تولیدی در pHهای مختلف به



شکل ۱. pH بهینه برای رشد گیاه و پالایش نیکل

(اعداد میانگین تولید زیست‌توده تر± انحراف معیار و ۳ =n می‌باشند و بر اساس آزمون LSD حروف لاتین نشانه اختلافات معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح ۵٪ می‌باشند)

صورت ۷> ۹/۵ > ۵/۵ به دست آمد. با توجه به نتایج می‌توان بیان داشت که حساسیت گیاه به pH های قلیایی کمتر از pHهای اسیدی است و گیاه در pH های خنثی و قلیایی بهتر رشد می‌کند. رشد بیشتر نشان از تطابق بهتر و بیشتر این گیاه با pH = ۷ است و این pH برای پالایش سبز فلز سنگین نیکل توسط علف شاخی در نظر گرفته شد.

پژوهش‌های بسیاری در مورد گیاهان آبزی برای به‌دست آوردن pH بهینه جذب عناصر و هم‌چنین تعیین pH بهینه پالایش سبز عناصر کمیاب صورت گرفته است. بسته به جنس، گونه و واریته گیاهان مورد بررسی نتایج متفاوتی به‌دست آمده است. از آن جمله می‌توان به پژوهش سیجیدجر و همکاران (۲۶) اشاره کرد که pH بهینه جذب سرب را برای دو گیاه آبزی (*Typha latifolia* L.) و (*Ceratophyllum demersum* L.) به ترتیب ۹ و ۷ به دست آوردند.

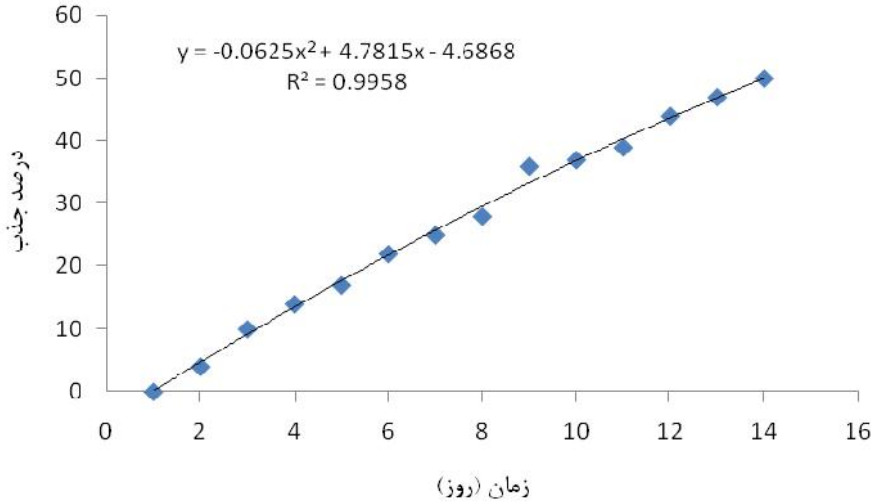
تغییرات غلظت روزانه نیکل در پساب

تغییرات غلظت نیکل در محلول طی دوره رشد ۱۴ روزه نشان داد که مقدار نیکل در محلول کشت هیدروپونیک روندی کاهشی داشته است. این کاهش با توجه به بسته بودن سیستم کشت و هم‌چنین ناچیز بودن مقدار رسوب، نشانه حذف نیکل از محلول و در نتیجه پالایش پساب شبیه‌سازی شده است.

در شکل ۲ روند کلی تغییرات ۱۴ روزه غلظت نیکل در محلول کشت آلوده ارائه شده است. می‌توان کاهش غلظت نیکل را در هر ۴ سطح آلودگی در این شکل مشاهده کرد. این روند نشان از جذب نیکل به وسیله گیاه علف شاخی و یا رسوب در محلول دارد. در تمامی سطوح آلودگی نیکل، کاهش چشمگیری رخ داده است. این تغییرات در همه موارد با گذشت زمان روند کاهشی دارد و نشانگر افزایش مقدار جذب نیکل با افزایش مقدار زیست‌توده گیاهی طی دوره زمانی آزمایش است.

افزایش زمان کشت سبب کاهش میزان نیکل محلول می‌گردد و این روند تا جایی ادامه خواهد یافت که گیاه زنده است. اما با مرگ گیاه، مقداری از عنصر جذب شده آزاد خواهد شد. مقادیر غلظت نهایی نیکل هر یک از تیمارها در جدول ۲ نشان داده شده است. این جدول کاهش ۵۰، ۴۷/۵، ۴۷/۵ و ۴۷ درصدی نیکل به ترتیب در سطوح ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر آلودگی را نشان می‌دهد. بیشترین کارایی جذب در سطح آلودگی ۱ میلی‌گرم بر لیتر نیکل مشاهده می‌شود.

مارین و ارون (۲۰) نیز نتایج مشابهی در حذف بر و هم‌چنین خلف و زردائویی (۱۸) در پالایش روی به کمک عدسک آبی (*Lemna gibba*) از محیط آبی به‌دست آوردند.



شکل ۲. تغییرات روزانه درصد جذب نیکل در غلظت اولیه ۱ میلی گرم در لیتر توسط علف شاخی

جدول ۲ . مقادیر غلظت نهایی و درصد جذب نهایی نیکل در محلول غذایی در سطوح مختلف آلودگی

غلظت اولیه نیکل در پساب شبیه سازی شده (mg/L)	۱	۲	۴	۶
غلظت نهایی نیکل در پساب شبیه سازی شده (mg/L)	۰/۵	۱/۰۵	۲/۱	۳/۱۸
درصد جذب ۱۴ روزه نیکل	۵۰	۴۷/۵	۴۷/۵	۴۷

جدول ۳ . مقایسه مقادیر نهایی نیکل در گیاه با غلظت اولیه آن در پساب شبیه سازی شده

غلظت اولیه نیکل در پساب شبیه سازی شده (mg/L)	۱	۲	۴	۶
غلظت نهایی نیکل در گیاه (mg/kg)	۱۳۵/۰۹	۲۹۸/۶۹	۶۴۵/۰۷	۲۰۳۱/۸۸
شاخص جذب نیکل در گیاه (mg)	۰/۸۹	۱/۶۸	۳/۴۰	۵/۰۵

تجمع فلزات سنگین در گیاه

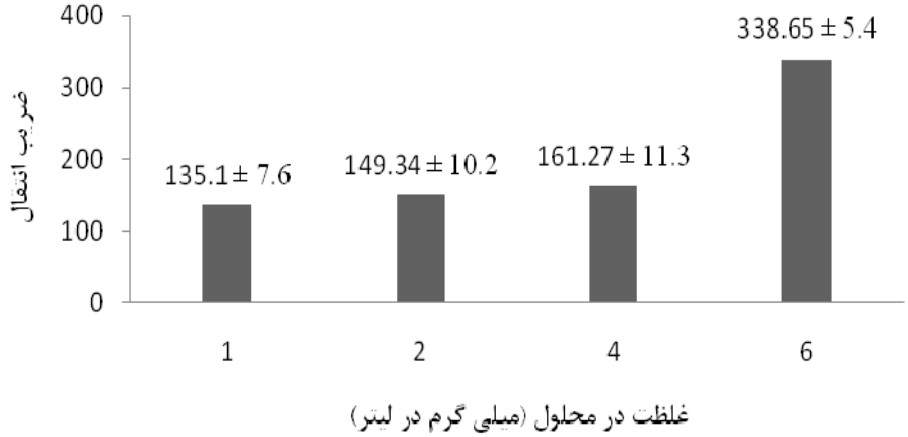
مقدار کل نیکل در علف شاخی با افزایش غلظت اولیه به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۳).

غلظت نیکل در علف شاخی از ۱۳۵/۰۹ تا ۲۰۳۱/۸۸ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاه تغییر کرد. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین غلظت جذب شده مربوط به تیمار ۶ میلی‌گرم در لیتر نیکل و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱ میلی‌گرم در لیتر بوده است.

ضریب انتقال

ضریب انتقال (Transfer coefficient) یا عامل غلظت زیستی (Bio-concentration factor, BCF) هر عنصر از تقسیم غلظت عنصر در اندام گیاهی به غلظت کل عنصر در محیط کشت به دست می‌آید (۷ و ۱۷).

ضریب انتقال برای گیاهان رشد یافته در سطوح آلودگی ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر محلول کشت، به ترتیب ۳۳۸/۶۵، ۱۶۱/۲۷، ۱۴۹/۳۴ و ۱۳۵/۱ به‌دست آمد. همان طور که در



شکل ۳. تغییرات ضریب انتقال نیکل به گیاه با توجه به غلظت‌های اولیه آن در محلول کشت

(اعداد، میانگین ضرایب انتقال ± انحراف معیار، ۳ =n می‌باشند)

شکل ۳ نمایان است، ضریب انتقال با افزایش غلظت نیکل در محلول روندی کاملاً افزایشی داشته است.

شاخص جذب

شاخص جذب (Uptake index) هر عنصر از حاصل‌ضرب مقدار وزن ماده خشک در غلظت عنصر در اندام هوایی به‌دست می‌آید. این شاخص معیاری مناسب برای تعیین پالایش عناصر فلزی و در واقع قوی‌ترین معیار برای تعیین پتانسیل پالایش گیاه می‌باشد (۷).

همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده، شاخص جذب با افزایش غلظت نیکل در پساب شبیه سازی شده افزایش یافته است. خلف و زردائویی (۱۸) نیز افزایش مقدار روی پالایش شده را با افزایش غلظت روی در محلول رشد گیاه عدسک آبی گزارش کردند.

درصد جذب روزانه نیکل در پساب

حذف روزانه نیکل از پساب شبیه سازی شده با شاخص درصد جذب نیکل بیان شده است. این شاخص از تقسیم غلظت کاهش یافته روزانه نیکل در محلول کشت بر غلظت اولیه تیمار شده به دست می‌آید (۱۸). از این شاخص برای نشان دادن میزان حذف گیاهی نیکل از غلظت ۱ میلی‌گرم در لیتر پساب شبیه سازی شده استفاده شده است (شکل ۲).

در تمامی تیمارها، با افزایش زمان کل، مقدار جذب افزایش داشت و ۱۴ روز پس از شروع تیمار گذاری، حداکثر درصد جذب نیکل حاصل شد. میشرا و تریپاتی (۲۴) نیز گزارش کردند که با افزایش زمان و یا دوره کشت گیاه در محلول، میزان پالایش و حذف فلزات سنگین و یا تجمع فلزات سنگین در گیاهان آبزی افزایش می‌یابد.

همان طور که مشاهده می‌شود و مطابق مطالعات میشرا و تریپاتی (۲۴)، میراندا و همکاران (۲۱) و میرتزکی و همکاران (۲۲)، غلظت فلز سنگین به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. راندمان پالایش نیکل از پساب شبیه سازی شده بین ۴۷٪ تا ۵۰٪ بود. این نتایج نشان داد که پالایش بهینه عناصر سنگین در محیط‌های آب در غلظت‌های کمتر رخ می‌دهد.

نمودار بازده جذب در تمامی تیمارها از الگویی با توان دوم پیروی کرد که بیانگر کاهش مقدار خالص جذب به ازای هر روز با گذر زمان است. در این الگوی جذب، در نهایت با گذر زمان و افزایش مقدار تجمعی غلظت در گیاه، مقدار تجمعی جذب ثابت شده و بازده لحظه‌ای جذب روند افزایشی ندارد.

جدول ۴. شاخص تولید زیست‌توده گیاه علف شاخی برای سطوح مختلف آلودگی

تیمار (میلی‌گرم نیکل در لیتر)	۰ (شاهد)	۱	۲	۴	۶
تولید زیست‌توده گیاهی (گرم بر روز)	۳/۶	۲/۲۶	۱/۸۴	۱/۵۱	۱/۲۷

شاخص تولید زیست توده

این شاخص، نرخ تولید زیست‌توده گیاه را در سطوح مختلف آلودگی می‌سنجد (۱۹). به کمک این شاخص، مقدار وزن تر زیست‌توده تولید شده توسط گیاهان در محیط رشد، نسبت به مقدار اولیه وزن تر زیست‌توده در طول زمان کشت گیاهان، مورد مقایسه قرار گرفت.

در جدول ۴، شاخص تولید زیست‌توده گیاه چنگال آبی برای سطوح مختلف آلودگی نیکل در پساب شبیه سازی شده آورده شده است. به طور نسبی می‌توان گفت که با افزایش آلودگی (افزایش غلظت نیکل محلول) ماده تر کمتری تولید شده و در نتیجه شاخص تولید زیست‌توده کاهش یافته است. این نتایج به دست آمده با نتایج مارین و ارون (۲۰) در پالایش بر به کمک عدسک آبی و هم‌چنین کارا و همکاران (۱۶) در پالایش نیکل مطابقت دارد. به عبارت دیگر، سمیت نیکل با افزایش غلظت محلول افزایش داشته و سبب کاهش سرعت رشد گیاه گردیده است.

نتیجه‌گیری

گیاه‌پالایی با گیاه آبزی علف شاخی روشی مناسب برای حذف نیکل از پساب‌ها می‌باشد. طی دوره ۱۴ روزه کشت، علف شاخی کارایی خوبی در پالایش نیکل داشت. بر اساس نتایج، افزایش زمان کشت سبب کاهش میزان نیکل محلول می‌گردد و این روند تا جایی ادامه خواهد یافت که گیاه زنده است. اما با مرگ گیاه، مقداری از عنصر جذب شده آزاد خواهد شد. در pH بهینه رشد گیاه (pH=۷)، بیشترین کارایی پالایش نیکل ۵۰٪ در سطح آلودگی ۱ میلی‌گرم در لیتر، و بیشترین ضریب انتقال و شاخص جذب نیکل در سطح ۶ میلی‌گرم در لیتر، به ترتیب ۳۳۸/۶۵ و ۵/۰۵ میلی‌گرم به دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار شاخص تولید زیست‌توده گیاهی ۱/۲۷ و ۳/۶ گرم در روز، به ترتیب در سطوح آلودگی ۶ و صفر میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. هر چند در روش گیاه‌پالایی، پالایش کامل فلز سنگین در کوتاه مدت صورت نمی‌گیرد، اما با توجه به ارزان بودن و کارایی بالای آن، می‌تواند روشی مؤثر در پالایش پساب‌های آلوده به نیکل باشد. با این وجود، قبل از استفاده صنعتی، انجام پژوهش‌های بیشتر با استفاده از پساب طبیعی ضروری است.

سپاسگزاری

از مهندس مهری دیناروند در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اهواز و مهندس نادر زارع در سازمان آب و برق خوزستان که امکان انجام برخی اندازه‌گیری‌ها را در آن مراکز فراهم کردند، و هم‌چنین کلیه مسئولان و متصدیان آزمایشگاه‌های آن مراکز و آزمایشگاه‌های گروه علوم خاک دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی می‌گردد.

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 ۹(۲): ۱۱-۱۹.

۲. 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.

۳. جاوید، ا. ح. و ح. صمدیار. ۱۳۸۶. مدل‌سازی تأثیر pH در انتقال فلزات سنگین (نیکل و کادمیوم) ناشی از فعالیت‌های پتروشیمی بندر امام خمینی در خلیج فارس (خور موسی). علوم و تکنولوژی محیط زیست ۹(۴): ۱-۱۳.
۴. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶- الف. هیدروپونیک. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.
۵. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶- ب. مبانی تغذیه گیاه. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ۱۷۰-۱۸۰.
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 آلودگی‌های زیست محیطی. علوم و تکنولوژی محیط زیست ۹(۲): ۱-۱۰.
۷. 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. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۱۲۴-۱۲۸.
۸. قهرمان، ا. ۱۳۷۳. کورمورفیت‌های ایران (سیستماتیک گیاهی). انتشارات دانشگاه تهران، جلد چهارم، ص ۵۵-۶۰.
۹. میرباقری، س. ا.، ا. شمس، س. ح. هاشمی و ه. شمس. ۱۳۸۹. حذف نیکل دو ظرفیتی از فاضلاب صنایع آبکاری به روش اسمز معکوس. علوم و تکنولوژی محیط زیست ۱۲(۱): ۱-۱۱.

10. Abul Kashem, M. D., 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 Pollut. 192: 273-279.
11. APHA. 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th Ed., Washington DC.
12. Aravind, P. and M. N. V. Prasad. 2005. Cadmium-zinc interaction in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: Adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. Plant Physiol. 17(1): 3-20.
13. Ayyasamy, P. M., S. Rajakumar, M. Sathishkumar, K. Swaminathan and K. Shanthid .2009. Nitrate removal from synthetic medium and groundwater with aquatic macrophytes. Desalination 242: 286-296.
14. Demirezen, D. 2007. Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae). J. Hazard. Mater. 147: 74-77.
15. Fox, L. J., P. C. Struik, B. L. Appleton and J. H. Rule. 2008. Nitrogen phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). Water Air Soil Pollut. 194: 199-207.
16. Kara, Y., D. Basaran, I. Kara, A. Zeytunluoglu and H. Genc. 2003. Bioaccumulation of nickel by aquatic macrophyta *Lemna minor* (duckweed). Intl. J. Agric. Biol. 5(3): 281-283.
17. Khan, S., I. Ahmad, M. T. Shah, Sh. Rehman and A. Khaliq. 2009. Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater. J. Environ. Manage. 90: 3451-3457.
18. Khellaf, N. and M. Zerdaoui. 2009. Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant *Lemna gibba* L. Bioresource Technol. 100: 6137-6140.
19. Lu, Q., Z. L. He, D. A. Graetz, P. J. Stoffella and X. Yang. 2008. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). Environ. Sci. Pollut. Res. DOI 10.1007/s11356-008-0094-0.
20. 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 Res. 41: 4579-4584.
21. 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.
22. Miretzky, P., A. Saralegui and A. Fernandez. Cirelli. 2004. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). Chemosphere 57: 997-1005.
23. Mishra, S., S. Srivastava, R. D. Tripathi, R. Kumar, C. S. Seth and D. K. Gupta. 2006. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum dermersum* L.) involves induction of phytochelatins and response of antioxidants in response to its accumulation. Chemosphere 65: 1027-1039.
24. Mishra, V. K. and B. D. Tripathy. 2008. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. Bioresource Technol. 99: 7091-7097.
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 Pollut. 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. Intl. J. Agric. Biol. 6(1): 168-172.
27. Saygideger, S. and M. Dogan. 2004. Lead and cadmium accumulation and toxicity in the presence of EDTA in *Lemna minor* L. and *Cratophyllum demersum* L. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 73: 182-189.
28. 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. Pollut. Res. 14(7): 490-497.
29. 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.