محیط‌شناسی، دورهٔ ٤١، شمارهٔ ٢، تابستان ١٣٩٤، صفحهٔ ٣٧٢-٣٦١

# بررسی پتانسیل گیاهان نی، تیفا و برموداگراس بر شاخص انتقال و انباشت سرب

**سعید طاهری قناد[1]*، هادی معاضد[2]، سعید برومندنسب[3]**

۱. ستادیار گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

۲. استاد دانشکدهٔ مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران، hmoazed955@yahoo.com

۳. استاد دانشکدهٔ مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران، boroomandsaeed@yahoo.com

تاریخ وصول مقاله:۹۳/۹/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹٤/۱/۲۵

**چکیده**

در این تحقیق گونه‌های گیاهی نی، تیفا و برموداگراس به منظور ارزیابی پتانسیل گیاه‌پالایی فاضلاب آلوده به سرب در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بررسی شدند. به این منظور پس از کاشت و مرحلهٔ رویشی، آبیاری با فاضلاب مصنوعی و سطوح مختلف غلظت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم سرب در لیتر انجام و در پایان دورهٔ آزمایش از اندام‌های هوایی و زمینی گیاهان مورد مطالعه نمونه‌برداری شد. پس از آن شاخص انتقال و انباشت سرب برای این نمونه‌ها اندازه‌گیری و بر اساس آن، اثر نوع گیاه و سطوح مختلف غلظت فاضلاب روی انباشت سرب در اندام‌های هوایی و زمینی بررسی شد. نتایج نشان داد که شاخص انتقال در گیاه نی، تیفا و برموداگراس به ترتیب ۵/۵، ۲/۲ و ۱/۷ بود. بنابراین، مکانیزم عمدهٔ گیاه‌پالایی در گیاه نی عمدتاً به صورت جذب ریزوسفری و در دو گیاه تیفا و برموداگراس به صورت جذب ریزوسفری و گیاه استخراجی انجام می‌شد. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که گونهٔ گیاهی و سطوح مختلف غلظت فاضلاب اثر متقابل معنی‌دار در سطح ۵ درصد در انباشت سرب در بخش اندام‌های هوایی و زمینی داشت. نتایج نشان داد بیشترین انباشت در بخش اندام‌های زمینی، مربوط به گیاه نی به میزان ۰/۵۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک ریشه و ریزوم و بیشترین انباشت در بخش اندام‌های هوایی، مربوط به گیاه تیفا به میزان ۰/۱۶۴ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک ساقه و برگ به دست آمد.

**کلیدواژه**

انباشت سرب، شاخص انتقال، گیاه آبزی.

## ۱. سرآغاز

سرب از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود که از راه‌های مختلف منابع آب و خاک را آلوده می‌کند. این عنصر در فهرست سازمان محیط‌زیست کشورهای صنعتی و در حال توسعه، از جمله سمی‌ترین فلزات سنگین محسوب می‌شود. لذا پالایش خاک و آب‌های آلوده به این عنصر، از مهم‌ترین سیاست‌های زیست‌محیطی این کشورهاست (موحدیان عطار و ابراهیمی، ۱۳۸۲). سرب فلزی غیرضروری برای بدن است، به طوری که وجود هر مقدار از آن در بدن، بیانگر آلودگی به این عنصر است. سرب در سلول‌ها جایگزین کلسیم می‌شود و فعالیت اعضای بدن را مختل می‌کند. همچنین، سبب اختلال در عملکرد کلیه و کبد، آسیب به اعضای تناسلی و دستگاه تولیدمثل، کم‌خونی، کاهش بهرهٔ هوشی و بروز عوارض متابولیکی می‌شود (یاسایی و همکاران، ۱۳۸۹). حذف و کنترل آلودگی فلزات سنگین، به علت

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۶۳۴۵۸۹۷۷ Email: staheri2007@yahoo.com

متعدد و متفاوت‌بودن منابع آلوده‌کنندهٔ آن‌ها بسیار مشکل است، زیرا هر منبع آلوده‌کننده، فرایند تصفیهٔ خاص خود را می‌طلبد. تاکنون روش‌های بسیاری برای تصفیهٔ فاضلاب‌ها ابداع و استفاده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به فرایند ترسیب شیمیایی، اسمز معکوس و استفاده از مبادله‌کننده‌های یونی آلی اشاره کرد که هر کدام مزایا و معایب خاصی دارند (کاظمیان، ۱۳۷۸؛ هاشمیان و همکاران، ۱۳۹۳). از جمله روش‌های مطلوب بیولوژیکی برای بهره‌گیری در حذف آلاینده‌ها استفاده از گیاهان و به بیان دیگر گیاه‌پالایی است. در واقع در گیاه‌پالایی استفاده از پتانسیل‌های فیزیولوژیکی گیاهان سبز (انواع علف‌های هرز، گیاهان آبزی و مردابی، گیاهان زراعی و حتی درختان) در کنترل و جذب آلاینده‌های آلی و معدنی به صورت پالایش سبز در کنار سایر روش‌های تصفیهٔ فاضلاب مطرح می‌شود. به عبارت دیگر، گیاه‌پالایی عبارت است از تکنیک استفاده از گیاهان به منظور تمیزکردن یا کنترل گونه‌های آلودگی اعم از فلزات، حشره‌کش‌ها، روغن‌ها و ... (Jadia and Fulekar, 2009; Hazrat, et al., 2013). در این روش گونه‌های مختلف گیاهی می‌توانند به منزلهٔ فیلترهای زیستی نقش مهمی را در حذف آلودگی‌های محیطی به عهده داشته باشند. برخی از عناصر سنگین مانند سرب و کادمیوم می‌توانند جذب گیاه و در برگ یا شاخه‌ها انباشته شوند. به طور کلی گیاهان در پالایندگی محیط زیست، پنج فرایند اصلی را به کار می‌برند که عبارت‌اند از:

گیاه استخراجی[1]، تثبیت گیاهی[2]، فساد گیاهی[3]، تبخیر گیاهی[4] و جذب ریشه‌ای[5] که شامل جذب و تجمع املاح و فلزات سنگین در ریشهٔ گیاه است (آفتاب‌طلب، ۱۳۸۶؛ خداکرمی، ۱۳۸۶). این روش رفع آلودگی، سبب حفظ فعالیت بیولوژیک و ساختار فیزیکی فاضلاب و خاک آلوده می‌شود و بسیار کم‌هزینه و ارزان است (Pulford and Watson, 2003). همچنین، به علت هماهنگ‌بودن با محیط زیست و داشتن کمترین آسیب، بیشترین توجهات را به‌منزلهٔ دوستدار محیط‌زیست به خود معطوف کرده است (آفتاب‌طلب، ۱۳۸۶). اولین مطالعات به منظور تصفیهٔ پساب، از طریق گیاهان شناور آبزی (سنبل و عدسک آبی) در سال ۱۹۷۱ به وسیلهٔ ناسا صورت گرفت. سپس، اولین سیستم بزرگ گیاهان آبزی برای تصفیهٔ فاضلاب شهری در سال ۱۹۷۴ در مرکز فضایی جان استنیس متعلق به ناسا، در می سی سی پی ساخته شد. هزینهٔ فناوری گیاه‌پالایی در امریکا برای کنترل منابع آلایندهٔ خطرناک نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای، در خاک، آب‌های سطحی و زیرزمینی و رسوبات در حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد کمتر از سایر روش‌های فیزیکی و شیمیایی برآورد شده است. از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های این روش، عمق زیاد آلودگی در محیط، شرایط اقلیمی نامساعد گیاه و غلظت‌های بالای آلاینده گزارش شده است (McGrath, et al., 2002). بنابراین، گیاهان استفاده‌شده در گیاه‌پالایی باید بتوانند مقدار زیادی از فلز سنگین را انباشت کنند، همچنین به حضور فلز سنگین در آب و خاک بردبار و توانایی تولید زیتودهٔ بالا در خاک آلوده را داشته باشند. در سال‌های اخیر، بررسی‌های گیاه‌پالایی بر گیاهان بیش‌انباشت‌کننده، که توانایی انباشت مقدار زیادی از فلزات را دارند، متمرکز شده است (Doumett, et al., 2008). با توجه به فرایندهای گیاه‌پالایی، انتخاب نوع گیاه با مقاومت بالا و متناسب با نوع آلاینده از اهمیت زیادی برخوردار است تا بتوان حداکثر کارایی مورد انتظار در این روش را نتیجه گرفت. در این تحقیق اثر سه گونه گیاه آبزی شامل نی، تیفا و برمودا‌گراس روی شاخص انباشت و انتقال سرب از اندام‌های زمینی به هوایی بررسی می‌شود. شناسایی گیاهان بیش‌انباشت‌کننده و مکانیسم تحمل آن‌ها به عناصر سنگین می‌تواند کمک شایانی برای مدیریت طرح‌های زیست‌پالایی در مناطق آلوده باشد. اطلاع از انباشت عناصر سنگین در ریشه یا اندام‌های هوایی این گیاهان نیز فرایند گیاه تثبیتی یا استخراجی را مشخص و مدیران محیط‌زیستی را در ایجاد محیط پاک کمک می‌کند.

## ۲. مواد و روش بررسی

### ۲. ۱. گیاهان مورد مطالعه

نی، از خانوادهٔ فراگمیت با نام علمی استرالیس و از تیرهٔ گندمیان است. نام محلی آن نی جارو، نی قلم یا نال است. از ردهٔ گیاهان تک‌لپه‌ای است و در محیط‌های کم و بیش مرطوب و آبدار مانند بستر رسوبات تجمع می‌یابد و در پشت سدها و در مسیر زهکش‌های اصلی روباز در شبکه‌های آبیاری و زهکشی رشد می‌کند و دیده می‌شود. جنس آن سخت و دارای ریزوم تقریباً متورم، رونده و بدون کرک است. ساقهٔ آن محکم، ایستاده، گاهی ضخیم، بدون کرک، منفرد و بلند و ارتفاع آن بین ۱ تا ۴ متر است.

به تیفا، تیفاسیا یا لویی نیز گفته می‌شود. گیاهان آبزی و نیمه‌آبزی دائمی (چندساله) معمولاً در کنار آبگیرها به ارتفاع ۱ تا ۲ متر رشد می‌کنند و ساقهٔ زیرزمینی رونده دارند. برگ‌های اکثراً قاعده‌ای این گونهٔ گیاهی، دو ردیف دارند و با غلافی که تقریباً ساقه را دربر می‌گیرد کاملاً راست است. پهنک برگ خطی است و بافتی دارد که حفره‌های هوایی در میان آن قرار گرفته است. تیرهٔ لویی در ایران ۸ گونه است، این گیاه به نام‌های محلی کوفو، لبون، گرزمال و تونک نیز معروف است.

برموداگراس، به نام‌های علف مرغ، پنجهٔ مرغی و بنداوش نیز معروف است. از خانوادهٔ گندمیان، چندساله و چهارکربنه است که از طریق بذر، ریزوم و استولون تکثیر می‌یابد. علفی است با ریزوم‌های فلسی که قسمت‌های هوایی از ریزوم‌ها خارج می‌شوند و زمین را مثل چمن می‌پوشانند. این گیاه در برابر لگدکوبی‌ها و شرایط ماندابی، مقاومت زیادی دارد. ارتفاع ساقه‌های علف مرغ بین ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و طول برگ‌های آن بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر است. برگ‌ها به رنگ خاکستری تا سبز مایل به آبی‌اند (مظفریان، ۱۳۷۸).

### ۲. ۲. آماده‌سازی طرح و کشت گیاهان

به منظور اجرای این تحقیق، گلدان‌هایی پلاستیکی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر تهیه شد. برای کشت گیاهان مورد مطالعه، از شن با قطر دانه های ۱ تا ۵ میلی‌متری برای بستر رشد گیاه به عمق ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد که پس از آماده‌سازی، گلدان‌ها به فاصلهٔ مناسب از هم قرار داده شدند. گیاهان انتخابی شامل نی، تیفا و برموداگراس با توجه به فراوانی آن‌ها در منطقه انتخاب شدند. نمونه‌های گیاهی جوان به وسیلهٔ بیل از حاشیهٔ رودخانهٔ دز استخراج و در سطل‌های بزرگ جمع‌آوری و سریعاً به محل انجام تحقیق واقع در مزرعهٔ آزمایشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول منتقل شدند. پس از آماده‌سازی بستر و افزودن مواد مغذی به محیط کشت، هر محیط کشت به صورت تصادفی به یک تیمار و در سه تکرار اختصاص یافت. گیاهان کشت‌شده از بین جوان‌ترین نمونهٔ گونه‌های مورد نظر در هر محیط کشت انتخاب شدند. پس از شستشوی ملایم گیاهان با آب، سه بوتهٔ گیاهی به فواصل منظم، با فاصلهٔ حداقل ۵ سانتی‌متری از دیوارهٔ ظرف و در عمق ۱۰ سانتی‌متر (تراکم ۲۵ بوته در هر متر مربع) کشت شدند. پس از آماده‌سازی گلدان‌ها و کاشت گونه‌های گیاهی مورد نظر، آبیاری با آب معمولی به مدت ۴۰ روز انجام شد، زیرا آبیاری با فاضلاب مصنوعی در مراحل اولیهٔ کشت به دلیل بی‌ثباتی ریشه و سازگاری با محیط کشت جدید، سبب تنش به گیاهان می‌شد. بنابراین، پس از سپری‌شدن این مدت، آبیاری با فاضلاب شبیه‌سازی‌شده و سطوح مختلف غلظت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم سرب در لیتر انجام شد. با توجه به اینکه جرم مولکولی نیترات سرب ۱/۶ جرم سرب است، لذا برای تهیهٔ این سطوح، غلظت‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ میلی‌گرم نیترات سرب بر لیتر استفاده شد. بدین منظور نیترات سرب شرکت مرک با انحلال بالا تهیه و با آب آبیاری بدون سرب اختلاط شد. عملیات آبیاری با فاضلاب شبیه‌سازی‌شده نیز بر اساس برنامهٔ آبیاری مطابق جدول ۱ انجام شد. حجم فاضلاب صنعتی مصرفی در کل آبیاری‌ها ۱۶ لیتر برای هر گلدان بود که به منظور جلوگیری از آثار پژمردگی به صورت یک در میان صورت گرفت. دور آبیاری نیز با توجه به تبخیر ۱۰ میلی‌متر بر روز از تشت تبخیر به فواصل ۵ روز در نظر گرفته شد.

**جدول ۱. برنامهٔ آبیاری با آب آبیاری و فاضلاب شبیه‌سازی‌شده از تاریخ ۱۳۹۳/۲/۱ تا ۱۳۹۳/۵/۱۳**

| تاریخ | ۱۳۹۳/۲/۱ | ۲/۱- /۳/۱۰ | ۳/۱۱ | ۳/۱۶ | ۳/۲۱ | ۳/۲۶ | ۴/۱ | ۴/۶ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عملیات | کاشت | آبیاری | فاضلاب | آبیاری | فاضلاب | آبیاری | فاضلاب | آبیاری |
| تاریخ | ۴/۱۱ | ۴/۱۶ | ۴/۲۱ | ۴/۲۶ | ۴/۳۱ | ۵/۵ | ۵/۱۰ | ۱۳۹۳/۵/۱۳ |
| عملیات | فاضلاب | آبیاری | فاضلاب | آبیاری | آبیاری | آبیاری | آبیاری | برداشت |

## ۲. ۳. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری

در پایان دورهٔ آزمایش، تمام بوته‌ها از گلدان‌ها خارج و پس از شستشو با آب و خشک‌شدن با هوا، آسیاب و با روش هضم تر عصاره‌گیری شدند. برای این منظور به یک گرم پودر (ریشه یا اندام هوایی) ۱۰ میلی‌گرم اسید نیتریک (۶۵ درصد) افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۵ درجهٔ سانتی‌گراد در حمام بن ماری قرار گرفتند، سپس ۳ میلی‌گرم پراکسید هیدروژن ۲۰ درصد به آن افزوده شد. پس از سردشدن نمونه‌ها، با کاغذ صافی صاف و با آب مقطر به حجم ۳۰ میلی‌لیتر رسانده شدند (Sposito, etal., 1982). کلیهٔ اندازه‌گیری‌های مربوط به بافت گیاه پس از عصاره‌گیری، با کمک دستگاه جذب اتمی مدل Perklim Elmer AAnalyst 700 اندازه‌گیری شدند.

## ۳. بحث و نتایج

### ۳. ۱. اثر نوع گیاه در انباشت سرب

نتیجهٔ تجزیهٔ واریانس نشان داد که بین میانگین مربعات انباشت سرب در اندام‌های زمینی گونه‌های مختلف و در تیمار سطح پایین غلظت سرب اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد وجود دارد. بنابراین، اندام‌های زمینی گونه‌های گیاهی مورد مطالعه در تیمار سطح پایین سرب، اثر معنی‌دار در انباشت سرب دارند. علاوه بر آن، مقایسهٔ میانگین‌ها مطابق جدول ۲ به ترتیب برای سطوح مختلف غلظت سرب و با نرم‌افزار $SPSS_{18}$ و آزمون دانکن انجام شد. متوسط میانگین انباشت برای اندام‌های زمینی گیاه برموداگراس، نی و تیفا به ترتیب ۰/۱۰۶، ۰/۱۷۹ و ۰/۰۹۶ میلی‌گرم در گرم از بافت خشک ریشه، برای تیمار سطح پایین غلظت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تفاوت بین میانگین‌ها در سه گونهٔ گیاهی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود به طوری که بیشترین مقدار انباشت مربوط به ریشهٔ گیاه نی و کمترین آن در ریشهٔ برموداگراس اتفاق افتاد. نتایج مقایسهٔ میانگین مربعات انباشت در اندام‌های هوایی و تیمارهای سطح پایین غلظت نیز نشان داد که اختلاف میانگین‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار نبود. در ادامهٔ این جدول برای سطوح متوسط غلظت فاضلاب، متوسط میانگین انباشت برای اندام‌های زمینی گیاه برموداگراس، نی و تیفا به ترتیب ۰/۱۸۳، ۰/۳۹۷ و ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در گرم وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شد. نتیجهٔ تجزیهٔ واریانس و مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون دانکن (جدول ۲) نشان داد که تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد بین میانگین‌های انباشت در اندام‌های زمینی سه گونهٔ گیاهی وجود داشت، به گونه‌ای که بیشترین مقدار جذب مربوط به ریشهٔ گیاه نی و کمترین آن در ریشهٔ برموداگراس اتفاق افتاد. نتایج نشان داد که در تیمار سطح متوسط غلظت فاضلاب، اندام‌های هوایی و نوع گیاه، در سطح ۱ درصد بر انباشت سرب اختلاف معنی‌دار نداشتند. در تیمار سطح بالای غلظت سرب نیز متوسط انباشت سرب برای اندام‌های زمینی برموداگراس، نی و تیفا به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۵۴۴ و ۰/۳۱۶ میلی‌گرم در گرم وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شد. نتیجهٔ تجزیهٔ واریانس و مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون دانکن نیز بیان‌کنندهٔ تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد بین میانگین‌های انباشت سرب در ریشهٔ سه گونهٔ گیاهی بود؛ به گونه‌ای که بیشترین مقدار متوسط جذب مربوط به ریشهٔ

گیاه نی و کمترین آن در ریشهٔ برمودگراس مشاهده شد. نتایج تجزیهٔ واریانس و مقایسهٔ میانگین‌ها در اندام‌های هوایی و تیمار سطح بالای غلظت نیز نشان داد که اختلاف تیمارها در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود. بنابراین، نتایج نشان داد که ریشهٔ سه گونهٔ مختلف گیاهی اثر معنی‌دار روی انباشت سرب داشت، اما اندام‌های هوایی سه گونهٔ مختلف گیاهی اثر معنی‌دار روی انباشت سرب نداشتند و بین سه گونهٔ مختلف گیاهی بیشترین انباشت در ریشهٔ گیاه نی و بیشترین انباشت در اندام‌های هوایی، مربوط به گیاه تیفا و در سطح بالای غلظت به دست آمد. Ye و همکاران (۱۹۹۷ a,b) آثار بقایای یک معدن سرب را طی آزمایش گلخانه‌ای روی گیاه نی و ظرف مدت ۸۹ روز بررسی کردند و در شرایطی که غلظت قابل استخراج سرب خاک ۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، میزان حداکثر سرب موجود در ریشه و اندام‌های هوایی به ترتیب در محدودهٔ ۴۸۹–۸۳۰ و ۳۵– ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک متغیر بود که با نتایج این تحقیق مطابقت داشت و گیاه نی به‌منزلهٔ گیاه فراانباشت[۶] معرفی شد. محقق دیگری نظیر Machado-Strada و همکاران (۲۰۱۳)، Peng و همکاران (۲۰۰۸)، Yoon و همکاران (۲۰۰۶) و Zhao و همکاران (۲۰۱۱) نیز نتیجه گرفتند که عمده محل جذب فلزات سنگین در اندام‌های زمینی گونه‌های مورد مطالعه بود و با افزایش غلظت این فلزات، میزان انباشت نیز افزایش می‌یافت.

**جدول ۲. اثر نوع گیاه روی متوسط جذب سرب و در سطوح مختلف غلظت سرب (mg/g)**

| تیمار: نوع گیاه | اندام‌های زمینی | اندام‌های هوایی |
|---|---|---|
| اثر نوع گیاه روی جذب سرب در تیمارهای سطح پایین غلظت سرب | | |
| Cy = برمودگراس | ۰/۱۰۶$^{a}$±۰/۰۲۵ | ۰/۰۶۶$^{a}$±۰/۰۱۵ |
| Ph = نی | ۰/۱۷۹$^{b}$±۰/۰۲۹ | ۰/۰۲۸$^{a}$±۰/۰۱۳ |
| Ty= تیفا | ۰/۰۹۶$^{a}$±۰/۰۲۶ | ۰/۰۴۴$^{a}$±۰/۰۲۶ |
| نتیجهٔ بررسی اثر | P<0.05 | p>0.01 |
| اثر نوع گیاه روی جذب سرب در تیمارهای سطح متوسط سرب | | |
| Cy = برمودگراس | ۰/۱۸۳$^{a}$±۰/۰۳۶ | ۰/۱۰۳$^{a}$±۰/۰۲۴ |
| Ph = نی | ۰/۳۹۷$^{b}$±۰/۰۴۳ | ۰/۰۶۹$^{a}$±۰/۰۲۱ |
| Ty= تیفا | ۰/۲۷$^{a}$±۰/۰۳۸ | ۰/۱۰۹$^{a}$±۰/۰۲۷ |
| نتیجهٔ بررسی اثر | P<0.01 | p>0.01 |
| اثر نوع گیاه روی جذب سرب در تیمارهای سطح بالای سرب | | |
| Cy = برمودگراس | ۰/۲۷۰$^{a}$±۰/۰۴۱ | ۰/۱۵۱$^{a}$±۰/۰۳۳ |
| Ph = نی | ۰/۵۴۴$^{b}$±۰/۰۵۵ | ۰/۱۲۷$^{a}$±۰/۰۴۲ |
| Ty = تیفا | ۰/۳۱۶$^{a}$±۰/۰۴۷ | ۰/۱۶۴$^{a}$±۰/۰۳۵ |
| نتیجهٔ بررسی اثر | P<0.01 | p>0.05 |

A و b حروف مختلف، نشان‌دهندهٔ معنی‌داربودن اختلاف میانگین‌هاست.

### ۳. ۲. اثر سطوح مختلف غلظت در انباشت سرب

جدول ۳ اثر سطوح مختلف غلظت روی جذب سرب در اندام‌های هوایی و زمینی گونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس آن متوسط سرب جذب‌شده از طریق ریشه و ریزوم گیاه برموداگراس برای سطوح پایین، متوسط و بالا به ترتیب ۰/۱۰۶، ۰/۱۸۳ و ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در گرم، برای ریشه و ریزوم گیاه نی به ترتیب ۰/۱۷۹، ۰/۳۹۷ و ۰/۵۴۴ و برای ریشه و ریزوم گیاه تیفا به ترتیب ۰/۰۹۶، ۰/۲۷۰ و ۰/۳۱۶ میلی‌گرم در گرم اندازه‌گیری شد. نتیجهٔ تجزیهٔ واریانس و مقایسهٔ میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن نیز نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد بین کلیهٔ میانگین‌های انباشت سرب در اندام‌های زمینی سه گونهٔ مختلف بود. بنابراین، سطوح مختلف غلظت، در جذب سرب از طریق ریشهٔ سه گونهٔ مختلف اثر معنی‌دار در سطح ۱ درصد داشتند؛ به گونه‌ای که با افزایش سطوح مختلف غلظت، میانگین انباشت سرب در سه گونهٔ مختلف در حال افزایش بود. البته افزایش انباشت در گیاه برموداگراس کمتر و برای گیاه نی به مراتب بیشتر بود، به نظر می‌رسد گیاه نی به دلیل مقاومت بیشتر به آلایندهٔ سرب و گسترش و پراکنش بیشتر ریشه‌ها، از ظرفیت جذب بالاتری نسبت به دو گونهٔ تیفا و برموداگراس برخوردار است. نتیجهٔ بررسی انباشت سرب در اندام‌های هوایی نیز نشان داد که سطوح مختلف غلظت روی انباشت سرب در اندام‌های هوایی سه گونهٔ مورد مطالعه اثر معنی‌دار در سطح ۵ درصد داشتند. به طوری که بیشترین انباشت در اندام‌های هوایی تیفا به میزان ۰/۱۶۴ میلی‌گرم بر گرم و کمترین آن در گیاه نی به میزان ۰/۰۲۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک رخ داد. Khellaf and Zerdoui (۲۰۰۹)، Jafari and Akhavan (۲۰۱۱) و Mishra and Tripathi (۲۰۰۸) نتایج مشابهی را مبنی بر اثر معنی‌دار سطوح مختلف غلظت فاضلاب روی جذب و انباشت عناصر مختلف در گیاهان مورد آزمایش استخراج کردند.

**جدول ۳. اثر سطوح مختلف غلظت روی جذب سرب در گونه‌های مختلف (mg/g)**

| تیمار: سطوح مختلف غلظت | اندام‌های زمینی | اندام‌های هوایی |
|---|---|---|
| اثر سطوح مختلف غلظت روی جذب سرب در گیاه برموداگراس | | |
| C1= غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۱۰۶$^{a}$±۰/۰۲۵ | ۰/۰۶۶$^{a}$±۰/۰۱۵ |
| C2= غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۱۸۳$^{ab}$+۰/۰۳۶ | ۰/۱۰۳$^{ab}$+۰/۰۲۴ |
| C3= غلظت ۱۵ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۲۷۰$^{b}$±۰/۰۴۱ | ۰/۱۵۱$^{b}$±۰/۰۳۳ |
| نتیجهٔ بررسی اثر | (p<0.01) | (p<0.05) |
| اثر سطوح مختلف غلظت روی جذب سرب در گیاه نی | | |
| C1= غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۱۷۹$^{a}$±۰/۰۲۹ | ۰/۰۲۸$^{a}$±۰/۰۱۳ |
| C2= غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۳۹۷$^{b}$±۰/۰۴۳ | ۰/۰۶۹$^{a}$+۰/۰۲۱ |
| C3= غلظت ۱۵ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۵۴۴$^{c}$±۰/۰۵۵ | ۰/۱۲۷$^{b}$±۰/۰۴۲ |
| نتیجهٔ بررسی اثر | (p<0.01) | (p<0.05) |
| اثر سطوح مختلف غلظت روی جذب سرب در گیاه تیفا | | |
| C1= غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۰۹۶$^{a}$±۰/۰۲۶ | ۰/۰۴۴$^{a}$±۰/۰۲۶ |
| C2= غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۲۷۰$^{b}$±۰/۰۳۸ | ۰/۱۰۹$^{b}$±۰/۰۲۷ |
| C3= غلظت ۱۵ میلی‌گرم در لیتر | ۰/۳۱۶$^{b}$±۰/۰۴۷ | ۰/۱۶۴$^{c}$±۰/۰۳۵ |
| نتیجهٔ بررسی اثر | (p<0.01) | (p<0.05) |

### ۳. ۳. اثر متقابل نوع گیاه و سطوح مختلف غلظت فاضلاب در انباشت سرب و شاخص انتقال

مطابق نتایج تجزیهٔ واریانس، بین میانگین مربعات انباشت سرب در تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد وجود داشت. بنابراین، اندام‌های هوایی و زمینی گونه‌های مختلف و سطوح مختلف غلظت، اثر متقابل معنی‌دار در سطح ۵ درصد در انباشت سرب داشتند. مطابق جدول ۴، بیشترین میزان انباشت سرب در اندام‌های زمینی گیاه نی و در تیمار سطح بالای غلظت سرب (Phc3) به میزان ۰/۵۴۴ میلی‌گرم در گرم و کمترین مقدار آن در تیمار تیفا در سطح پایین غلظت سرب (Tyc1) و به میزان ۰/۰۹۶ میلی‌گرم در گرم به دست آمد. بیشترین میزان انباشت در بخش اندام‌های هوایی نیز در گیاه تیفا و در سطح بالای غلظت سرب (Tyc3) به میزان ۰/۱۶۴ میلی‌گرم در گرم و کمترین مقدار آن در تیمار نی و در سطح پایین غلظت سرب (Phc1) و به میزان ۰/۰۲۸ میلی‌گرم در گرم به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که اندام‌های زمینی گیاه نی به دلیل زی‌تودهٔ بیشتر و حجم بیشتر ریشه‌ها از توان بالاتری برای ذخیره‌سازی و جذب سرب نسبت به سایر گونه‌ها برخوردار بودند. در خصوص اندام هوایی (ساقه و برگ گیاه) نیز گیاه تیفا بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد که احتمالاً به دلیل جذب بیشتر آب و املاح در بخش‌های هوایی این گیاه است. علاوه بر آن، شاخص انتقال[۷] که بیان‌کنندهٔ نسبت میزان جذب سرب در ریشه به ساقه است نیز محاسبه و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شد. مطابق با آن، هر اندازه این شاخص زیادتر باشد، نشان‌دهندهٔ توان بیشتر گیاه در جذب و ذخیره‌سازی سرب در بخش اندام‌های زیرزمینی است. به طور کلی این شاخص به خصوصیات ژنوتیپی و فیزیولوژیکی اندام‌های هوایی گیاه از قبیل شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و زی‌تودهٔ هوایی در انتقال و ذخیره‌سازی آلاینده و در بخش زمینی نیز پراکنش و گسترش ریشه‌ها، تعداد ریزوم‌ها و سطح ریشه‌ها در جذب عناصر و املاح بستگی دارد. بر اساس جدول ۴ متوسط مقدار شاخص انتقال در گیاه برموداگراس، نی و تیفا به ترتیب ۱/۷، ۵/۵ و ۲/۲ بود که بیشترین آن در گیاه نی و کمترین آن در برموداگراس اتفاق افتاد. مقایسهٔ شاخص انتقال در سه گونهٔ گیاهی نشان داد که گیاه نی بخش بیشتری از سرب جذب‌شده را در ریشهٔ خود ذخیره‌سازی می‌کرد. همچنین، افزایش سطوح مختلف غلظت در گیاه نی، اثر معنی‌دار روی شاخص انتقال داشت، به گونه‌ای که با افزایش سطوح غلظت، شاخص انتقال در گیاه نی از ۶/۳۹۳ به ۴/۲۸۳ کاهش یافت. بر این اساس، نتایج نشان داد گیاه نی، در غلظت‌های پایین، تمایل بیشتری به ذخیره‌سازی آلایندهٔ سرب در ریشه و ریزوم داشت که با افزایش سطوح غلظت، گیاه نی از کلیهٔ ظرفیت خود به خصوص در بخش‌های هوایی نیز استفاده می‌کرد. علاوه بر آن سرب، جزو فلزات سنگین محسوب می‌شود، لذا به دلیل سنگین‌بودن، تمایل کمتری به انتقال و جابه‌جایی به سطوح بالاتر اندام‌های هوایی گیاه نی داشت. همچنین، گیاه نی از ارتفاع بیشتری نسبت به دو گونهٔ دیگر برخوردار بود بنابراین، به تجمع در اندام‌های زمینی (ریشه و ریزوم) تمایل بیشتری داشت. شکل ۱ نیز مؤید این مطلب است که گیاه نی از توان بالاتری در جذب سرب به خصوص در بخش زمینی برخوردار بود؛ به گونه‌ای که بیش از ۸۰ درصد سرب جذب‌شده در ریشهٔ گیاه تجمع یافت. بنابراین، مکانیزم عمدهٔ گیاه‌پالایی در گیاه نی به صورت جذب ریزوسفری[۵] است. این مکانیزم یک استراتژی سم‌زدایی و افزایش مقاومت به آلاینده‌های موجود در آب و خاک است. در گیاه برموداگراس نیز افزایش سطوح مختلف غلظت، اثر معنی‌دار روی شاخص انتقال نداشت. شاخص انتقال در این گونه نشان داد که مقدار سرب انباشت‌شده در ریشه به طور متوسط حدود ۱/۷۲ برابر بخش هوایی بود که این به مراتب از گیاه نی و تیفا کمتر بود. مطابق جدول ۴ و شکل ۱ حدود ۶۰ درصد سرب جذب‌شده در ریشهٔ گیاه و مابقی در برگ و ساقه آن تجمع داشت. همچنین، تجمع سرب در بخش اندام‌های

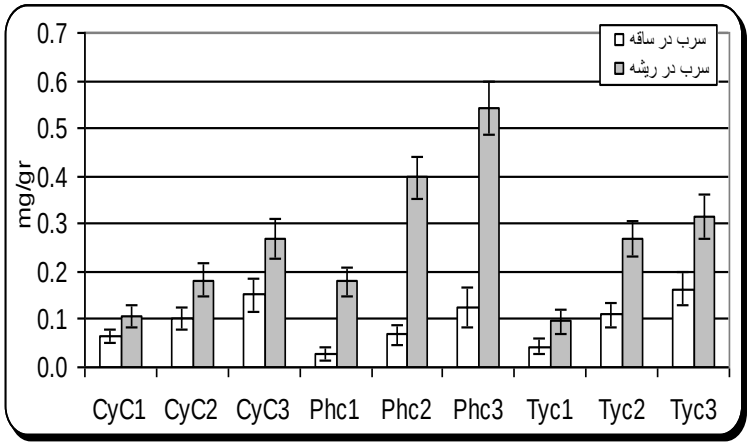
هوایی گیاه برمودا‌گراس از گیاه نی به مراتب بیشتر بود که دلیل آن را می‌توان در کوتاه‌تربودن بخش هوایی و تسهیل در حرکت به بخش هوایی آن دانست. در خصوص گیاه تیفا نیز بر اساس شاخص انتقال، مقدار انباشت سرب ریشه به طور متوسط حدود ۲/۱۹ برابر مقدار موجود در بخش هوایی بود. به عبارت دیگر، حدود ۷۰ درصد سرب جذب‌شده از طریق گیاه در ریشه تجمع می‌یافت که این مقدار در حد فاصل بین دو گونهٔ نی و برمودا‌گراس قرار داشت. مهم‌ترین خصوصیت گیاه تیفا، جذب و انتقال بیشتر به اندام‌های هوایی بود به طوری که بیشترین مقدار را بین سه گونهٔ مورد مطالعه به خود اختصاص داد. به نظر می‌رسد مکانیزم عمدهٔ گیاه‌پالایی در این گیاه عمدتاً به صورت جذب ریزوسفری[5] و گیاه استخراجی[1] بود. در گیاهان، اصولاً انتقال یون‌ها از طریق غشای سلولی از طریق پروتئین‌هایی به نام ترانسپورترها میانجی‌گری می‌شود. این ترانسپورترها (حمل‌کننده‌های یونی) انتقال‌دهندهٔ یون خاص‌اند و به صورت اختصاصی عمل می‌کنند. از کل یون‌هایی که در اطراف ریشه قرار می‌گیرند فقط قسمت اندکی جذب گیاه می‌شوند. قسمت اعظم این یون‌ها به طور فیزیکی جذب دیوارهٔ سلولی می‌شوند. در دیوارهٔ سلولی بخشی که به طور منفی باردار است و به نام سایت Coo نامیده می‌شود مسئول جذب سطحی در دیوارهٔ سلولی است. یون‌هایی که به این قسمت می‌چسبند نمی‌توانند وارد سلول و به قسمت‌های هوایی گیاه منتقل شوند. یکی دیگر از دلایل افزایش میزان کادمیوم در ریشهٔ گیاهان مورد مطالعه تجمع آن‌ها در واکوئل‌هاست. تجمع این عناصر در واکوئل‌های سلولی مانع انتقال آن‌ها به قسمت‌های هوایی می‌شود و به همین علت مقدار این عنصر در ریشه به مراتب بیشتر از اندام‌های هوایی است. در هر صورت، جذب عناصر سنگین در واکوئل‌ها و به ویژه در دیوارهٔ سلولی برای گیاه از سمیت بسیار کمتری برخوردار است (مصلح‌آرانی و همکاران، ۱۳۹۳). Bonanno and Logiudice (۲۰۱۰) در تحقیقی غلظت فلزات سنگین از جمله سرب روی اندام‌های گیاه نی برداشت‌شده از رودخانهٔ Imera Meridionale را اندازه‌گیری کردند و نتایج نشان داد که بیشترین محل تمرکز سرب در اندام ریشه بود. بنابراین، غلظت اندام ریشهٔ نی را به‌منزلهٔ شاخص زیستی مهم برای مشاهدهٔ آلودگی رسوب و آب معرفی کردند. پارسادوست و همکاران (۱۳۸۶) نیز در تحقیقی غلظت سرب در اندام‌های هوایی و زمینی ۱۱ گونهٔ گیاهی بومی منطقهٔ ایرانکوه اصفهان در نزدیکی معدن سرب باما را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که فاکتور انتقال بین گونه‌های گیاهی در محدودهٔ ۰/۳۶ تا ۳/۷ متغیر بود و گونه‌های گون اسبی و جو سیخ از عملکرد گیاه‌پالایی بهتری برخوردار بودند. طبق اظهارات Foy و همکاران (۱۹۷۸) بخش بیشتری از سرب جذب‌شده در دیوارهٔ سلول‌های ریشه به صورت کربنات و فسفات رسوب می‌کند و موجب ایجاد شکاف‌هایی در دیواره‌ها می‌شود و در نتیجه از رشد طولی ریشه ممانعت به عمل می‌آورد. اثر کاهش زی‌تودهٔ ریشه و رشد آن در اثر مسمومیت با سرب در گیاهان دیگر نیز گزارش شده است. برای مثال، مطالعات Malecka و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که گیاه نخود تحت تیمار سرب، مقادیر زیادی از سرب را در ریشه‌ها انباشت می‌کرد. Burzynski (۱۹۹۷) بیان کرد که گیاه نخود تا ۷۵ میلی‌گرم سرب را در بخش ریشه‌ها انباشت می‌کرد و بردباری بالایی نسبت به سرب داشت. همچنین، میزان سرب در گیاه براسیکا حدود ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در اندام هوایی انباشته می‌شد و میزان انباشت سرب در ریشه‌ها حدود ۱۰ برابر بخش هوایی آن بود (Soltani, et al., 2006). تفاوت مشاهده‌شده در انباشت سرب در ریشه و بخش هوایی می‌تواند به این دلیل باشد که سمیت‌زدایی سرب، ابتدا از بخش ریشه‌ای شروع می‌شود و در پی آن، میزان سرب انتقال‌یافته به بخش هوایی به حداقل می‌رسد. سرب در ریشه‌ها بر اساس اتصال به محل‌های تغییرپذیر یون، روی دیوارهٔ سلول‌ها و رسوب فوق‌سلولی و اساساً به شکل کربنات سرب

ذخیره‌شده در دیوارهٔ سلول‌ها باقی می‌ماند (Soltani, et al., 2006؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۲). ملاحسینی و همکاران (۱۳۸۴) در بررسی تجمع سرب در بافت‌های ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با پساب آلوده به سرب مشاهده کردند که بیشترین مقدار تجمع آن در ریشه بود. بر اساس نتایج این پژوهش، سرب به سهولت از طریق ریشه‌های گیاه جذب شد، اما انتقال آن به اندام هوایی محدود می‌شد. سرب جذب‌شده از طریق گیاه در بخش‌های بیرونی ریشه، آپوپلاست و دیوارهٔ سلولی ذخیره می‌شد و کمتر در اختیار اندام هوایی قرار می‌گرفت.

**جدول ۴. اثر متقابل سطوح مختلف غلظت و نوع گیاه روی جذب سرب در اندام‌های مختلف (mg/g)**

| تیمار | اندام‌های زمینی** | اندام‌های هوایی** | میانگین وزنی | TF | میانگین TF |
|---|---|---|---|---|---|
| CyC1 | ۰/۱۰۶$^{a}$±۰/۰۲۵ | ۰/۰۶۶$^{ab}$±۰/۰۱۵ | ۰/۰۸۵ | ۱/۶۰۸ | |
| CyC2 | ۰/۱۸۳$^{b}$±۰/۰۳۶ | ۰/۱۰۳$^{bc}$±۰/۰۲۴ | ۰/۱۴۵ | ۱/۷۷۲ | ۱/۷۲۳ |
| CyC3 | ۰/۲۷$^{c}$±۰/۰۴۱ | ۰/۱۵۱$^{c}$±۰/۰۳۳ | ۰/۲۰۸ | ۱/۷۹ | |
| PhC1 | ۰/۱۷۹$^{b}$±۰/۰۲۹ | ۰/۰۲۸$^{a}$±۰/۰۱۳ | ۰/۱۱۷ | ۶/۳۹۳ | |
| PhC2 | ۰/۳۹۷$^{d}$±۰/۰۴۳ | ۰/۰۶۹$^{ab}$±۰/۰۲۱ | ۰/۲۸۱ | ۵/۷۵۴ | ۵/۴۷۷ |
| PhC3 | ۰/۵۴۴$^{e}$±۰/۰۵۵ | ۰/۱۲۷$^{cd}$±۰/۰۴۲ | ۰/۳۸۸ | ۴/۲۸۳ | |
| TyC1 | ۰/۰۹۶$^{a}$±۰/۰۲۶ | ۰/۰۴۴$^{a}$±۰/۰۱۶ | ۰/۰۶۹ | ۲/۱۸۲ | |
| TyC2 | ۰/۲۷$^{c}$±۰/۰۳۸ | ۰/۱۰۹$^{bc}$±۰/۰۲۷ | ۰/۱۸۶ | ۲/۴۷۳ | ۲/۱۹۵ |
| TyC3 | ۰/۳۱۶$^{c}$±۰/۰۴۷ | ۰/۱۶۴$^{d}$±۰/۰۳۵ | ۰/۲۴۵ | ۱/۹۲۹ | |

**حروف مختلف نشان‌دهندهٔ معنی‌داربودن اختلاف در سطح ۵ درصد ($P<0.05$)




**شکل ۱. مقایسهٔ میزان سرب اندازه‌گیری‌شده در اندام‌های زمینی و هوایی**

نتایج تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که اندام‌های زیرزمینی گیاهان باتلاقی به دلیل توانایی انتقال اکسیژن به ریشه‌ها و ریزوم‌ها، توانایی ذخیرهٔ بیشتری از فلزات سنگین و مواد مغذی فاضلاب را دارند و میزان اکسیژن منتقل‌شده به ریشه‌ها و اندام‌های زیرزمینی به جرم زندهٔ ریشه، چگالی و زی‌تودهٔ ریشه و ریزوم‌ها (Pederson, et el., 1995)، نوع و ژنوتیپ گونهٔ گیاهی (sand-jensen, et al., 1982)، منطقهٔ توسعهٔ ریشه‌ها (Connell, et al., 1999)، سن ریشه، فصل رشد و حتی ساعات شبانه‌روز (sand-jensen, et al., 1982) بستگی دارد. به عبارت دیگر، این عوامل می‌توانند

در میزان تجمع فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی و بازده حذف آلاینده‌ها در سامانه نیزارهای مصنوعی مؤثر باشند (Pederson, et al., 1995). علاوه بر آن، تجمع و انباشت فلزات از طریق گیاهان تالاب با عواملی نظیر موجودیت عناصر غذایی، تنوع گونهٔ گیاهی، مرحلهٔ رشد گیاه، نوع و غلظت عناصر آلاینده، میزان انتقال عناصر به بخش‌های مختلف، میزان شوری و مواد آلی خاک و اثر متقابل فلزات و یون‌ها کنترل می‌شود (Deng, et al., 2004؛ Fitzgerald, et al., 2003).

## ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سطوح مختلف غلظت، اثر معنی‌دار در سطح ۱ درصد در جذب سرب از طریق ریشهٔ سه گونهٔ مختلف داشت. به طوری که با افزایش سطوح مختلف غلظت فاضلاب، شاخص انباشت در بخش ریشه و ریزوم هر سه گونهٔ گیاهی افزایش می‌یافت. نتایج نشان داد بیشترین انباشت در بخش ریشه و ریزوم، مربوط به گیاه نی به میزان ۰/۵۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک (در تیمار سطح بالای غلظت) و کمترین آن مربوط به گیاه تیفا به میزان ۰/۰۹۶ میلی‌گرم بر گرم (در تیمار سطح پایین غلظت) اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری شاخص انباشت در بخش اندام‌های هوایی نیز نشان داد که بیشترین انباشت در اندام‌های هوایی گیاه تیفا به میزان ۰/۱۶۴ میلی‌گرم بر گرم و کمترین آن مربوط به گیاه نی به میزان ۰/۰۲۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک اندازه‌گیری شد. بنابراین، در بخش ریشه و ریزوم، گیاه نی و در بخش اندام هوایی، گیاه تیفا بهترین عملکرد را به خود اختصاص دادند. علاوه بر آن، نتایج نشان داد مقدار شاخص انتقال در گیاه نی، تیفا و برموداگراس به ترتیب ۵/۵ و ۲/۲ و ۱/۷ بود که بیشترین آن در گیاه نی و کمترین آن در برموداگراس اتفاق افتاد. بنابراین، مکانیسم عمدهٔ گیاه‌پالایی در گیاه نی به صورت جذب ریزوسفری بود، در حالی که در دو گیاه تیفا و برموداگراس به صورت جذب ریزوسفری و گیاه استخراجی انجام می‌شد.

## تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد واحد دزفول به خاطر تأمین هزینه‌ها و امکانات اجرایی این تحقیق، تقدیر و تشکر می‌شود.

## یادداشت‌ها

1. Phytoextraction
2. Phytostabilization
3. Phytodegradation
4. Phytovolatilization
5. Rhizofiltration
6. Hyperaccumulator
7. Translocation Factor

## منابع

آفتاب‌طلب، ن. ۱۳۸۶. بررسی توان پالایش دو عنصر سمی کادمیوم و سرب به وسیلهٔ نهال‌های دو سالهٔ دو گونهٔ چنار و سرو سیمین، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۳۰ ص.

پارسادوست، ف. بحرینی‌نژاد، ب. صفری سنجانی، ع. ا. کابلی، م. م. ۱۳۸۶. گیاه‌پالایی عنصر سرب توسط گیاهان مرتعی و بومی در خاک‌های آلودهٔ منطقهٔ ایرانکوه (اصفهان)، مجلهٔ پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شمارهٔ ۷۵: ۵۴- ۶۳.

کاظمیان، ح. ۱۳۷۸. آمایش پسماندهای رادیواکتیو منابع حاصل از محصولات شکافت اورانیوم طبیعی، رسالهٔ دکترای شیمی تجزیه، دانشکدهٔ شیمی دانشگاه اصفهان.

کریمی، ن. خان‌احمدی، م. مرادی، ب. ۱۳۹۲. اثر غلظت‌های مختلف سرب بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه کنگر فرنگی، مجلهٔ پژوهش‌های تولید گیاهی، جلد بیستم، شمارهٔ اول: ۴۹- ۶۲.

خداکرمی، ی. ۱۳۸۶. ارزیابی توان زیست‌پالایی خاک در دو گونهٔ بلوط ایرانی و بنه، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۴۶ ص.

ملاحسینی، ح. هراتی، م. اکبری، غ. حریری، ن. عبادی، ت. فوقی، ب. و بغوری، ا. ۱۳۸۴. تجمع فلزات سنگین در اندام‌های ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب، مجموعه مقالات نهمین کنگرهٔ علوم خاک ایران، ۶ تا ۹ شهریور، تهران.

مصلح‌آرانی، ا. خسروی، م. عظیم‌زاده، ح. ر. سودایی‌زاده ح. سپه‌وند، ا. ۱۳۹۳. بررسی پتانسیل گیاهان مورد و کاج در جذب کادمیوم، فصلنامهٔ محیط‌شناسی، ۴۰(۱): ۱۷– ۲۸.

مظفریان، و. ۱۳۷۸. فلور خوزستان، انتشارات مرکز تحقیقات منابع طبیعی و امور دام استان خوزستان، ۲۸۲ ص.

موحدیان عطار، ح. ابراهیمی، ا. ۱۳۸۲. ارزیابی کارایی زئولیت‌های طبیعی و رزین‌های مصنوعی در حذف یون‌های نیکل، روی و مس از فاضلاب‌های صنعتی، مجلهٔ پژوهش در علوم پزشکی، ۸: ۷۶– ۸۰.

هاشمیان قهفرخی، ص. لندی، ا. خادمی، ح. حجتی، س. ۱۳۹۳. حذف سرب و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از کانی‌های سپیولیت و زئولیت طبیعی ایران، فصلنامهٔ محیط‌شناسی،۴۰(۱): ۱۸۹– ۱۹۸.

یاسایی مهرجردی، غ. عزت‌پناه، ح. یاسینی اردکانی، ع. دادفرنیا، ش. ۱۳۸۹. ارزیابی مقادیر سرب و کادمیوم در شیر خام مناطق مختلف استان یزد، نشریهٔ علوم غذایی و تغذیه، ۷(۳): ۳۵– ۴۲.

Burzynski, M. 1997. The uptake and transpiration of water and the accumulation of lead by plants growing on lead chlirida solutions. Aoc. Bot. Pol. 56: 271-280.

Bonanno, G., Logiudice, R. 2010. Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* and their potential use as contamination indicators. Ecological Indicators 10(3):639–645.

Connell, E.L., Colmer, T.D., Walker, D.I. 1999. Radial oxygen loss from intact roots of Halophila ovalis as a function of distance behind the root tip and shoot illumination. Aquat Bot. 63:219–228.

Deng, H., Ye, Z.H. and Wong, M.H. 2004. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. Environmental Pollution 132: 29-40.

Doumett, S., Lamperi, L., Checchini, L., Azzarello, E., Mugnai, S., Mancuso, S., Petruzzelli, G. and Del bubba. M. 2008. Heavy metal distribution between contaminated soil and Paulownia tomentosa, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: influence of different complexing agents. Chemosphere 72: 1481-1490.

Fitzgerald, E.J., Caffrey, J.M., Nesaratnam, S.T. and McLoughlin, P. 2003. Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland. Environmental Pollution 123: 67-74.

Foy, C.D., Chaney, R.L. and White, M.C. 1978. The physiology of metal toxicity. Annu. Rev. Plant Physiol. 29: 511-566.

Hazrat, A., Khan, E., Anwar Sajad, M. 2013. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. Chemosphere 91 (7): 869–881.

Jadia, C.D. and Fulekar, M.H. 2009. Phyto-remediation of heavy metals: Recent techniques. African J. of Biotechnology 6: 921-928.

Jafari, N. and Akhavan, M. 2011. Effect of PH and heavy metal concentration on phytoaccumulation of zinc by three Duckweed species.American-Eurasian J. Agric&Environ. Sci. 10(1):304-41.

Khellaf, N. and Zerdaoui, M. 2009.Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant, Lemna gibba L. Bioresour Technol. 100(23):6137-40.

Machado-Estrada, B., Calderón, J., Moreno-Sánchez and, R., Rodríguez-Zavala, J.S. 2013.Accumulation of arsenic, lead, copper, and zinc, and synthesis of phytochelatins by indigenous plants of a mining impacted area. Environ Sci Pollut Res Int. 20(6):3946-55.

Malecka, A., Jarmuszkiewicz, W. and Tomaszewska, B. 2001. Antioxdative defense to lead stress in subcellular compartments of pea root cells. Acta Biochim. Polonica. 48: 687-698.

McGrath, S.P., Zhao, F.J. and Lombi, E. 2002. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides.

Advance in Agronomy 75:1– 56.

Mishra, V.K. and Tripathi, B.D. 2008.Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. Bioresour Technol. 99(15):7091-7.

Pedersen, O., Sand-Jensen K. and Revsbech, N.P. 1995. Die1 pulses of O2 and CO2 in sandy lake sediments inhabited by Lobelia dortmanna. Ecology 76:1536-1545.

Peng, K., Luo, C., Lou, L., Li, X. and Shen, Z. 2008. Bioaccumulation of heavy metals by the aquatic plants Potamogeton pectinatus L. and Potamogeton malaianus Miq. and their potential use for contamination indicators and in wastewater treatment. Sci Total Environ. 392(1):22-9.

Pulford, I.D. and Watson, C. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by tree- a review,

Environment International 29: 529-540.

Sand-Jensen, K., Prahl, C. and Stokholm, H. 1982. Oxygen release from roots of submerged aquatic rnacrophytes. Oikos 38: 349-354.

Soltani, F., Ghorbanli, M. and Manouchehri-kalantari, K.H. 2006. Effect of cadmium on photosynthetic pigments, sugars and malondealdehyde content in Brassica napus L. Iran. J. Biol. 2: 136-145.

Sposito, G., Hotzclaw, K.M., LeVesque-Madore, C.S., Johnston, C.T. 1982. Trace-metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage-sludge: Comparative study of the fulvic acid fraction. Soil Sci Soc Am J 46: 265–270.

Ye, Z.H., Baker, A.J.M., Wong, M.H. and Willis, A.J. 1997a. Copper and nickel uptake, accumulation and tolerance in populations of Typha latifolia L. New Phytologist 136: 469-480.

Ye, Z.H., Baker, A.J.M., Wong, M.H. and Willis, A.J. 1997b. Zinc, Lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common Reed, Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steudel. Annals of Botany 80: 363-370.

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q. and Lena, Q. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of The Total Environment. 368(2–3):456–464.

Zhao, H.Y., Lin, L.J., Yan, Q.L., Yang, X.Y., Zhu, X.M. and Shao, J.R. 2011. Effects of EDTA and DTPA on Lead and Zinc Accumulation of Ryegrass. Journal of Environmental Protection 2:932-939.