

بررسی معادلات سینتیک حذف بیولوژیکی سرب از فاضلاب صنعتی با استفاده از گیاهان آبی بومی خوزستان

سعید طاهری قناد^{۱*}، علی افروس^۲

۱. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

Ali.afrous@gmail.com

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۷/۱۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۶/۳

چکیده

در این تحقیق سینتیک حذف سرب با استفاده از روش گیاه‌پالایی و با گیاهان نی، تیفا و برموداگراس بررسی شد. به این منظور آبیاری با فاضلاب مصنوعی و با سطوح مختلف غلظت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم در لیتر انجام شد. نتایج با چهار مدل سینتیک درجه صفر، سینتیک درجه اول، توانی (هیگوجی) و وابسته‌نمایی برازش شد. نتایج ضریب همبستگی نشان داد که بهترین برازش به ترتیب اولویت با مدل نمایی، هیگوجی، تابع سینتیک درجه اول و تابع سینتیک درجه صفر به دست آمد و مدل نمایی و توانی طی دوره آزمایش از دقت بالاتری برخوردار بودند. این در حالی است که تابع سینتیک درجه اول و درجه صفر در زمان‌های اولیه و انتهای آزمایش از دقت لازم برخوردار نبودند. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که ضریب ثابت سرعت واکنش برای سه گونه گیاهی مورد مطالعه در محدوده ۰/۰۰۱۴ تا ۰/۰۰۷۱ بر روز متغیر بود که این مقدار برای گیاه نی از دو گونه دیگر بالاتر بود. بنابراین، شدت کاهش سرب خاک در شرایط کشت نی از سرعت بالاتری نسبت به دو گونه دیگر برخوردار بود.

کلیدواژه

حذف سرب، گیاه‌پالایی، گیاه آبی، مدل سینتیک.

۱. سرآغاز

آلودگی آب از طریق فلزات سنگین مسئله محیط‌زیستی جهانی است که به واسطه فعالیت‌های روزافزون بهره‌برداری از معادن، صنعتی‌شدن و شهرنشینی در سراسر کره زمین افزایش یافته است (Rostami and Joodaki, 2002). سرب از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود که از راه‌های مختلف منابع آب و خاک را آلوده می‌کند. این عنصر در فهرست سازمان محیط‌زیست امریکا از جمله سمی‌ترین فلزات سنگین محسوب می‌شود. لذا پالایش خاک و آب‌های آلوده به این عنصر، از مهم‌ترین سیاست‌های زیست‌محیطی کشورهای صنعتی و در حال توسعه است (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 بهره هوشی و بروز عوارض متابولیکی می‌شود (یاسایی و همکاران، ۱۳۸۹). حذف و کنترل آلودگی فلزات سنگین، به علت متعدد و متفاوت بودن منابع آلوده‌کننده آن‌ها بسیار مشکل است، زیرا هر منبع آلوده‌کننده، فرایند تصفیه خاص خود را می‌طلبد. تاکنون روش‌های بسیاری برای تصفیه فاضلاب‌ها ابداع و استفاده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به فرایند ترسیب

اختصاص داد و نتایج نشان داد که شاخص TF برای این سه گونه گیاهی بیشتر از یک است و گزارش کردند که برداشت دوره‌ای اندام‌های هوایی می‌تواند کیفیت و کارایی گیاه‌پالایی را افزایش دهد. Logiudice و Bonanno (۲۰۱۰) در تحقیقی غلظت فلزات سنگین از جمله سرب را روی اندام‌های گیاه نی برداشت‌شده از رودخانه ایمران اندازه‌گیری کردند و نتایج نشان داد که بیشترین محل تمرکز سرب در اندام ریشه بود. بنابراین، غلظت اندام ریشه نی را به‌منزله شاخص زیستی مهم برای مشاهده آلودگی رسوب و آب معرفی کردند. پارسادوست و همکاران (۱۳۸۶) نیز در تحقیقی غلظت سرب در اندام‌های هوایی و زمینی ۱۱ گونه گیاهی بومی منطقه ایران کوه اصفهان در نزدیکی معدن سرب باما را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که فاکتور انتقال بین گونه‌های گیاهی در محدوده ۰/۳۶ تا ۳/۷ متغیر بود و گونه‌های گون اسبی و جو سیخ از عملکرد گیاه‌پالایی بهتری برخوردار بودند. 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. براساس 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 دیواره سلولی ذخیره می‌شد و کمتر در اختیار اندام هوایی قرار می‌گرفت. بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون به دلیل پیچیدگی پیوستار خاک، آلاینده، آب و گیاه، مدل‌های ساده و کارآمدی برای گیاه‌پالایی ارائه نشده است (اکبرپور و همکاران، ۱۳۹۱). در مطالعات قبلی کمتر به موضوعات مدل‌سازی و مکانیسم‌های حذف سرب از خاک و فاضلاب پرداخته شده است. بنابراین، این تحقیق، معادلات سینتیک انباشت به وسیله گونه آبی بومی استان خوزستان را برای تعیین گونه مناسب‌تر به منظور گیاه‌پالایی مقایسه می‌کند. ارزیابی گیاهان بومی منطقه، شبیه‌سازی حذف فاضلاب

شیمیایی، اسمز معکوس و استفاده از مبادله‌کننده‌های یونی آلی اشاره کرد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند (کازمیان، 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 آبی و مردابی، گیاهان زراعی و حتی درختان) در کنترل و جذب آلاینده‌های آلی و معدنی به صورت پالایش سبز در کنار سایر روش‌های تصفیه 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 غیره است (Jadia and Fulekar, 2009; Hazrat, et al., 2013).

در این روش گونه‌های مختلف گیاهی می‌توانند به منزله فیلترهای زیستی، نقش مهمی را در حذف آلودگی‌های محیطی به عهده داشته باشند. برخی از عناصر سنگین مانند سرب و کادمیوم می‌توانند جذب گیاه شده و در برگ یا شاخه‌ها انباشته شوند. اطلاع از این امر کمک شایانی به مدیریت طرح‌های زیست‌پالایی در مناطق آلوده می‌کند (آفتاب‌طلب، ۱۳۸۶؛ خداکریمی، ۱۳۸۶). این روش رفع آلودگی، سبب حفظ فعالیت بیولوژیکی و ساختار فیزیکی خاک می‌شود و بسیار کم‌هزینه و ارزان است (Pulford and Watson, 2003). همچنین، به علت هماهنگ‌بودن با محیط‌زیست و داشتن کمترین آسیب، بیشترین توجهات را به‌منزله دوستدار محیط‌زیست به خود معطوف کرده است (آفتاب‌طلب، ۱۳۸۶).

Machado-Estrada و همکاران (۲۰۱۳) اثر سه گونه E.Prostrata Z.Acerosa و P.Incanum را در خاک آلوده به سرب و روی بررسی کردند و نتایج نشان داد که گیاه E.Prostrata، بیشترین توان جذب و به میزان ۰/۵۸۸ میلی‌گرم بر گرم بیومس خشک را برای این دو فلز به خود

در این رابطه y غلظت باقیمانده آلاینده در آب یا خاک و y_0 نیز غلظت اولیه آلاینده در زمان صفر، k نیز ثابت سرعت جذب بیولوژیک درجه اول بر حسب یک بر روز و t نیز زمان بر حسب روز است. با توجه به رابطه ۲ اگر جرم آلاینده باقیمانده در هر زمان خاص در نظر گرفته شود زمان مورد نیاز برای جذب یا تجزیه آلاینده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$t = -(\ln(y/y_0))/k \quad (۴)$$

ج) مدل هیگوچی (توانی)

در مدل هیگوچی، مقدار آلاینده تجزیه شده در مقابل ریشه دوم زمان ترسیم می‌شود.

$$y = kt^{0.5} \quad (۵)$$

که در این رابطه y آلاینده تجزیه شده بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم، k ثابت واکنش بر حسب یک بر روز و t بر حسب روز است (عابدی کوپایی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲. مواد و روش بررسی

۲.۱. آماده‌سازی طرح و کشت گیاهان

به منظور اجرای این تحقیق، گلدان‌های پلاستیکی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر تهیه شد. برای کشت گیاهان مورد مطالعه، از شن با قطر دانه‌های ۱ تا ۵ میلی‌متری به‌منزله بستر رشد گیاه و به عمق ۳۰ سانتی‌متر (متوسط وزن خشک، ۱۵ کیلوگرم) استفاده شد که پس از آماده‌سازی، گلدان‌ها به فاصله مناسب از هم قرار داده شدند. گیاهان انتخابی شامل نی، تیفا و برموداگراس بودند که با توجه به فراوانی آن در منطقه انتخاب شدند. نمونه‌های گیاهی جوان به وسیله بیل از حاشیه برکه‌ها، زهکش‌های سطحی روباز یا حاشیه آب‌های سطحی استخراج و در سطل‌های بزرگ جمع‌آوری و سریعاً به محل انجام تحقیق واقع در مزرعه آزمایشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول منتقل شدند. پس از آماده‌سازی بستر و افزودن مواد مغذی به محیط کشت، هر محیط کشت به

آلوده به سرب و در نهایت تعیین مدت زمان لازم برای حذف آلاینده از خاک می‌تواند کمک شایانی برای مدیریت طرح‌های زیست‌پالایی در مناطق آلوده باشد.

۱.۱. مدل‌های ریاضی در گیاه‌پالایی

خاک به‌منزله محیط مؤثری است که می‌تواند با بهره‌گیری از فرایند جذب سطحی برخی از مواد آلی و فلزات سنگین را در خود ذخیره کند. مدل‌های مختلفی برای بررسی نرخ جذب خاک از سوی پژوهشگران بررسی شده است که از آن جمله می‌توان به مدل لانگمویر، فرندولینچ و ایزوترم جذب خطی اشاره کرد. شایان یادآوری است که پدیده جذب سطحی به خودی خود قادر به کاهش غلظت آلاینده‌های آلی نخواهد بود و صرفاً در حرکت و نقل و انتقال جرم آلاینده‌ها تأخیر ایجاد می‌کند (Wiedemeier, et al., 1999؛ عابدی کوپایی و همکاران ۱۳۹۳).

الف) مدل سینتیک درجه صفر

در مدل سینتیک درجه صفر مقدار آلاینده تجزیه شده در مقابل زمان ترسیم می‌شود.

$$Y = k.t \quad (۱)$$

که در این رابطه، y آلاینده تجزیه شده بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم، k ثابت واکنش بر حسب یک بر روز و t بر حسب روز است.

ب) مدل سینتیک درجه ۱

مطابق روابط ۲ تا ۴ با استفاده از معادله سینتیک درجه ۱ می‌توان سرعت تجزیه آلاینده‌های آب و خاک و زمان مورد نیاز برای واکنش مؤثر را حدس زد.

$$K = U/y_0 \quad (۲)$$

در این رابطه y_0 غلظت اولیه آلاینده در خاک بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم، U سرعت تجزیه آلاینده و k نیز ثابت واکنش درجه اول بر حسب یک بر روز است.

$$y = y_0.e^{-kt} \quad (۳)$$

این مدت، آبیاری با فاضلاب شبیه‌سازی شده و با سطوح مختلف غلظت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم سرب در لیتر انجام شد. آبیاری با فاضلاب شبیه‌سازی شده براساس برنامه 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 پزردگی 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 ۲ مشخصات کیفی فاضلاب صنعتی مصرفی در تیمار سطح پایین غلظت سرب را نشان می‌دهد.

صورت تصادفی در سه تکرار به یک تیمار اختصاص یافت. گیاهان کشت شده از بین جوان‌ترین نمونه گونه‌های موردنظر در هر محیط کشت انتخاب شدند. پس از شستشوی ملایم گیاهان با آب، سه بوته گیاهی به فواصل منظم، با فاصله حداقل ۵ سانتی‌متری از دیواره ظرف و در عمق ۱۰ سانتی‌متر (تراکم ۲۵ بوته در هر متر مربع) کشت شد. بعد از آماده‌سازی گلدان‌ها و کاشت گونه‌های گیاهی موردنظر، آبیاری با آب معمولی به مدت ۴۰ روز انجام شد. چون آبیاری با فاضلاب مصنوعی در مراحل اولیه کشت به دلیل بی‌ثباتی ریشه و سازگاری با محیط کشت جدید، سبب تنش به گیاهان می‌شد، بنابراین، پس از سپری شدن

جدول ۱. برنامه آبیاری با آب آبیاری و فاضلاب شبیه‌سازی شده از تاریخ ۱۳۹۳/۲/۱ تا ۱۳۹۳/۵/۱۳

تاریخ	۱۳۹۳/۲/۱	۳/۱۰-۲/۱	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

جدول ۲. مشخصات کیفی فاضلاب مصرفی در تیمار سطح پایین غلظت سرب (میلی‌گرم بر لیتر)

pH	EC	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺² +Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Pb ⁺²
۶/۸	۰/۷۳	۴/۱	۱۶۷	۷۵	۱۴۸	۶۴	۶/۲	۱۱۴	۵

(1982) با هضم اسیدی خاک استفاده شد. به همین منظور مقدار ۲ گرم خاک خشک در ارلن دردار ریخته و به آن ۱۵ میلی‌گرم اسید نیتریک ۴ نرمال اضافه شد. ارلن‌ها برای ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در حمام بن‌ماری قرار گرفتند. پس از گذشت زمان یادشده، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ واتمن صاف و با آب مقطر به حجم ۳۰ سی‌سی رسانده شدند. کلیه اندازه‌گیری‌ها پس از عصاره‌گیری، با کمک دستگاه جذب اتمی مدل Perklm Elmer Aanalyst 700 انجام شدند. با توجه به اندازه‌گیری‌ها، روند کاهش سرب قابل استخراج خاک و

۲.۲. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری

با توجه به اینکه گلدان‌های استفاده شده در این تحقیق فاقد زهکش و خروجی بودند، بنابراین، میزان کاهش سرب خاک با فرض صرف‌نظر از تبخیر یونی^۱، بیانگر جذب جمعی از طریق گیاه بود. به این منظور، طی دوره آزمایش هر پنج تا ده روز از بستر گلدان‌ها نمونه‌گیری شد. نمونه‌های خاک برداشت شده به میزان ۱۰ گرم در روزهای ۰، ۴۱، ۵۱، ۶۲، ۷۲، ۸۲، ۹۲ و ۱۰۲ روز از زمان کاشت برداشت شد. برای اندازه‌گیری غلظت سرب در بستر از روش اصلاح‌یافته اسپوزیتو و همکاران (Sposito, et al.,)

گیاه ماکروفیت و C_a میزان عناصری است که در اثر تبخیر یونی خارج می‌شوند. براساس رابطه بالا، امکان محاسبه سرب جذب شده در سه گونه گیاهی و در زمان‌های مختلف نمونه برداری وجود داشت. همچنین در این تحقیق به دلیل ناچیز بودن تبخیر یونی، در رابطه بیلان از C_a صرف نظر شد. در این تحقیق براساس معادله بیلان جرم، بررسی لازم برای اثر تبخیر یونی نیز انجام شد که نتایج نشان داد تبخیر و تعرق گیاه اثر بسیار ناچیز روی معادله بیلان جرم و تبخیر یونی دارد و در تحقیقات مشابه نیز عمدتاً دلالت بر تبخیر یون‌هایی از قبیل جیوه و سلنیوم داشت و در خصوص یون سرب به دلیل سنگین بودن، ناچیز فرض شده است.

جذب گیاه نسبت به زمان بررسی و مدل مناسب با استفاده از نرم‌افزار کرواکسپرت ترسیم شد. پس از بررسی‌ها، گیاه مناسب از بین گونه‌های گیاهی انتخاب شد. جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری متوسط غلظت سرب خاک را در تیمار سطح پایین غلظت فاضلاب نشان می‌دهد. شایان یادآوری است با اندازه‌گیری غلظت سرب موجود در بستر، امکان محاسبه جذب تجمعی گیاه با استفاده از روش بیلان جرمی، مطابق رابطه ۶ وجود داشت.

$$C_i = C_w + C_s + C_c + C_a \quad (6)$$

در این رابطه C_i غلظت جرمی عناصر ورودی، C_w غلظت عناصر موجود در آب، C_s غلظت عناصر موجود در عصاره اشباع خاک، C_c غلظت عناصر جذب شده از طریق

جدول ۳. نتایج اندازه‌گیری متوسط سرب خاک در شرایط فاضلاب مصرفی با غلظت سطح پایین (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک)

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
برموداگراس	۲/۱	۱/۹۰۲	۱/۸۳	۱/۷۹	۱/۷۵	۱/۶۸	۱/۶۵۸	۱/۶۵۱	۱/۵۹۵
تیفا	۲/۱	۱/۹۵۲	۱/۸	۱/۷۰۴	۱/۶۷۲	۱/۶۴	۱/۵۶۷	۱/۵۴۶	۱/۴۸
نی	۲/۱۵۴	۱/۹۰۲	۱/۸۰۱	۱/۶۷	۱/۶	۱/۵۶	۱/۴۸	۱/۴۴	۱/۳۶

۳. بحث و نتایج

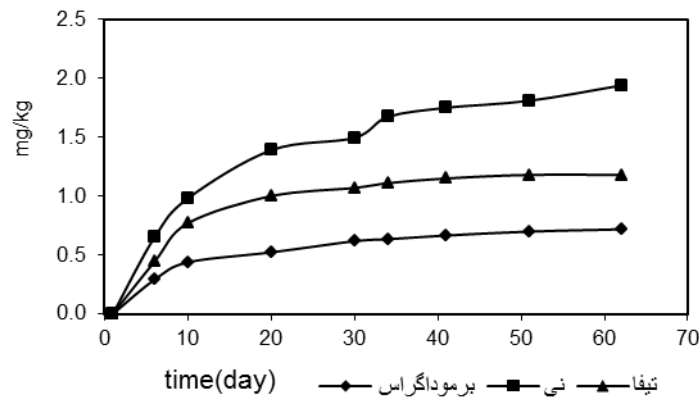
۳.۱. مدل رگرسیونی وابسته نمایی

مدل وابسته نمایی^۲ با استفاده از نرم‌افزار کرواکسپرت برای شبیه‌سازی سینتیک جذب در تیمارهای مختلف استفاده شد. شکل کلی این مدل به صورت $y = a.(1 - e^{-b.t})$ است. در این معادله t بر حسب روز و y میزان جذب سرب بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم تعریف شد. در همین خصوص منحنی‌های جذب سرب در گونه گیاهی برموداگراس، گونه گیاهی نی و گونه گیاهی تیفا در تیمار سطح متوسط غلظت سرب فاضلاب به ترتیب در شکل ۱ آمده است. براساس این ارزیابی ضرایب a و b ضرایب ثابت رگرسیونی اند که برای گونه‌های گیاهی مختلف و تحت سطوح مختلف غلظت، متفاوت اند. ضرایب جذب

سرب و رگرسیونی (R^2 ضریب همبستگی و s خطای استاندارد) از طریق گیاه برموداگراس، نی و تیفا برای سطوح مختلف غلظت فاضلاب در جدول ۴ به طور خلاصه آمده است. مطابق این مدل، سینتیک جذب از همبستگی بالایی برخوردار بود. لذا از این معادلات می‌توان برای شبیه‌سازی حذف سرب در غلظت‌های مختلف استفاده کرد. نتایج نشان داد با افزایش سطوح مختلف غلظت، ضریب همبستگی به اندازه محسوسی کاهش یافت. بنابراین، این مدل در غلظت‌های متوسط و بالا از دقت بالایی برخوردار بود. مقایسه مدل در گونه‌های مورد مطالعه نشان داد ضریب همبستگی در گیاه نی نسبت به دو گونه دیگر از مقدار بالاتری و برای این گیاه از تطابق بهتری برخوردار بود. لذا از این معادلات می‌توان برای شبیه‌سازی

جیوه از فاضلاب صنعتی و در شرایط کشت نی، تیفا و بوریا استفاده کردند و نتیجه گرفتند که این مدل سینتیک از همبستگی بالایی برخوردار بود. گودرزی و افروس (۱۳۹۱) نیز از این تابع برای مدل سازی جذب عناصر نیکل و کادمیوم در لجن فاضلاب استفاده کردند و نتیجه گرفتند که بین مقدار جذب عناصر نیکل و کادمیوم و زمان، همبستگی بالایی برخوردار بود و می توان از این مدل برای شبیه سازی مکانیسم حذف عناصر نیکل و کادمیوم استفاده کرد.

جذب سرب در زمان های مختلف و گونه های مختلف گیاهی به خصوص نی با ضریب همبستگی بالا استفاده کرد. بررسی روند تغییرات انباشت سرب در گونه های مخالف نشان داد که عمده انباشت سرب در ۳۰ روز ابتدایی پس از اتمام مرحله رویشی رخ می داد و تجمع آن در این دوره با سرعت بیشتری دنبال می شد و با گذشت زمان، سرعت انباشت کاهش می یافت. بنابراین، روند تغییرات انباشت در گیاه و کاهش غلظت آن در خاک از الگوی دوفازی تبعیت می کرد. افروس (۱۳۸۹) از مدل وابسته نمایی برای شبیه سازی گیاه پالایی عناصر آرسنیک و



شکل ۱. منحنی جذب سرب در گیاه نی، تیفا و برموداگراس در تیمار سطح متوسط سرب

جدول ۴. ضرایب رگرسیون تابع وابسته نمایی جذب سرب در گونه های مختلف گیاهی و سطوح مختلف غلظت فاضلاب

ضرایب رگرسیونی		ضرایب معادله جذب سرب		سطوح مختلف غلظت (میلی گرم در لیتر)	گونه گیاهی
S	R ²	ضریب b	ضریب a		
۰/۰۷	۰/۴۷	۰/۰۶۸	۰/۴۷	۵	برموداگراس
۰/۰۹	۰/۶۹	۰/۰۸۵	۰/۶۹	۱۰	
۰/۱۳	۰/۷۵	۰/۱۳	۱/۰۷	۱۵	
۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۷۸	۵	نی
۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۹	۱/۱۷	۱۰	
۰/۱۲	۰/۹۹	۰/۱۲	۲/۴۵	۱۵	
۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۶۱	۵	تیفا
۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۱۲	۱/۱۵	۱۰	
۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۱۳	۱/۸۶	۱۵	

اول، زمان ۳۸۴، ۱۹۰ و ۱۰۰ روز را به ترتیب در شرایط کشت برموداگراس، تیفا و نی و در تیمارهای سطح متوسط غلظت نیازمند است که نشان‌دهنده این بود که گیاه نی، از توان گیاه‌پالایی بیشتری نسبت به دو گونه دیگر برخوردار بود. بنابراین، غلظت بستر را در زمان کمتری به نصف غلظت اولیه سرب قابل جذب خاک خواهد رساند. این توان احتمالاً مرهون جذب بیشتر، فعالیت و تکثیر بیشتر میکروارگانیزم‌ها در اطراف ریشه و ریزوم این گیاه آبی است. نتایج مقایسه ضریب همبستگی در هر سه مدل (جدول ۵) نیز نشان داد که روند سینتیکی غلظت سرب باقیمانده خاک در شرایط کشت نی از همبستگی و تطابق بالاتری نسبت به سایر گونه‌های گیاهی برخوردار بود. نتایج نشان داد که ضریب ثابت سرعت واکنش برای سه گونه برموداگراس، تیفا و نی در محدوده ۰/۰۰۱۴ تا ۰/۰۰۷۱ بر روز متغیر بود که این مقدار برای گیاه نی از دو گونه دیگر بالاتر بود. بنابراین، شدت کاهش سرب خاک در شرایط کشت نی از سرعت بالاتری نسبت به دو گونه دیگر برخوردار و این ضریب ثابت در کلیه موارد با افزایش سطوح مختلف غلظت در حال کاهش بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سطوح غلظت، توان گیاه‌پالایی گونه‌های مورد مطالعه کاهش می‌یافت. مقایسه عملکرد سه گونه نشان داد گیاه نی نسبت به دو گونه دیگر از عملکرد بهتری در حذف سرب از فاضلاب آلوده به سرب برخوردار بود. به گونه‌ای که در تیمار با سطح متوسط غلظت فاضلاب و در شرایط کشت نی، برای رسیدن به حذف ۵۰ درصد غلظت اولیه، به زمان ۱۰۰ روز مورد نیاز بود. بررسی روند سینتیکی کاهش سرب خاک در این مطالعه نشان داد که شدت کاهش غلظت سرب خاک در ۳۰ روز اول پس از اتمام مرحله رویشی (۷۰ روز پس از کاشت) در سه گونه مورد مطالعه از شدت بیشتری برخوردار بود، اما پس از گذشت ۷۰ روز، سرعت حذف سرب از خاک کاهش می‌یافت. با این حال، براساس تعریف مدل سینتیک درجه اول و نتایج جدول ۵ نشان داد

۲.۳. برازش با سایر مدل‌های سینتیک

با توجه به طولانی بودن فرایند گیاه‌پالایی، استفاده از مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی فرایند و محاسبه زمان لازم برای پالایش خاک و رسیدن به حد مطلوب ضروری است. به همین منظور علاوه بر مدل وابسته نمایی، سه مدل سینتیک درجه صفر (تابع خطی)، سینتیک درجه یک و مدل هیگوجی (تابع توانی) نیز انتخاب و با داده‌های جمع‌آوری شده برازش شدند. این مدل‌ها براساس نتایج آنالیز غلظت سرب در خاک و گیاه بررسی شدند. شایان یادآوری است که براساس تعریف مدل‌ها و سوابق تحقیق موجود، تابع سینتیکی درجه یک با اطلاعات مربوط به مقدار غلظت سرب باقیمانده در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و دو مدل دیگر براساس میزان جذب از طریق گونه‌های مختلف گیاهی در تیمارهای مختلف برازش شدند. بر همین اساس، شکل سینتیکی کاهش سرب خاک طی دوره آزمایش با استفاده از نرم‌افزار کرواکسپرت برازش شد که نتایج آن در جدول ۵ آمده است. نتایج نشان داد مدل سینتیک درجه اول در کلیه تیمارها از ضریب همبستگی بالاتر و به تبع آن از خطای استاندارد کمتری (s) نسبت به مدل خطی برخوردار بود. مقایسه مدل سینتیک درجه یک با مدل سینتیک توانی نیز نشان داد که تابع هیگوجی (توانی) از ضریب همبستگی بالاتری برخوردار بود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که از مدل توانی هیگوجی برای شبیه‌سازی روند تغییرات سینتیکی سرب با ضریب همبستگی بالا استفاده شود. نمونه‌ای از برازش با این مدل‌ها، به صورت شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. براساس این شکل‌ها نتیجه‌گیری شد که مدل هیگوجی از دقت بالاتری در کلیه زمان‌های نمونه‌برداری برخوردار بود، در حالی که مدل‌های سینتیک درجه اول و درجه صفر در زمان‌های اولیه و انتهایی دقت لازم را نداشتند؛ اما در حفاصل این زمان‌ها از دقت قابل قبولی برخوردارند. بنابراین، زمان تعادل برای رسیدن به نصف غلظت اولیه خاک ($y/2$) محاسبه شد که براساس مدل سینتیک درجه

دریافت کردند. Hutchinson و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقی نشان دادند که زمان کافی برای استقرار و رشد گیاه در خاک آلوده، به منزله فاکتور مهمی در فرایند گیاه‌پالایی محسوب می‌شود. آن‌ها در آزمایش‌هایی که در شرایط گلخانه انجام شد با کاشت گیاهان برموداگراس و فستوکا در خاک آلوده به ترکیبات نفتی، اثر پوشش گیاهی و مقادیر مختلف کودهای ازته و فسفات را در تجزیه ترکیبات نفتی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که گیاه برموداگراس در شش ماه اول آزمایش، به میزان ۴۹ درصد آلودگی‌ها را کاهش داد و در شش ماه دوم آزمایش این مقدار به میزان ۶۵ درصد برای برموداگراس، ۶۲ درصد برای فستوکا رسید. آن‌ها گیاه‌پالایی را به منزله روشی مفید برای حذف انواع آلودگی‌ها در خاک معرفی کردند، به شرط آنکه زمان لازم و کافی برای استقرار و رشد گیاه در خاک و تجزیه بیولوژیک فراهم شود.

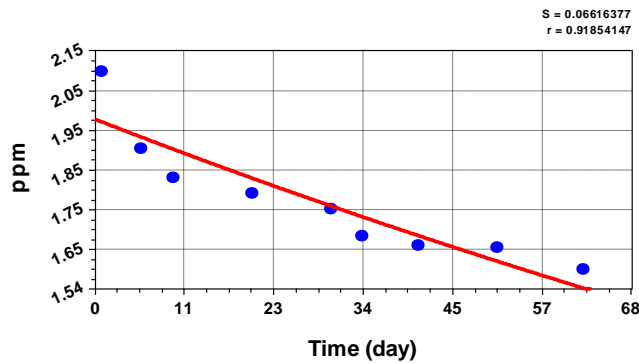
که ضریب ثابت سرعت واکنش برای گیاه نی از مقدار بیشتری نسبت به دو گونه برخوردار بود. نتایج مقایسه این سه مدل با مدل وابسته‌نمایی نیز نشان داد که مدل وابسته‌نمایی^۲ در سطوح مختلف غلظت فاضلاب از ضریب همبستگی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بود و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی سینتیک حذف سرب از فاضلاب استفاده کرد. Gunther و همکاران (۱۹۹۶) تعداد و فعالیت میکروبی بیشتری را با افزایش تجزیه آلودگی‌های هیدروکربنه در خاک کشت شده با گیاه ریگراس در مقایسه با خاک بدون گیاه پیدا کردند. آن‌ها دریافتند که ریشه‌های گیاه، رشد میکروبی را تحریک می‌کنند و سبب حذف آلودگی خاک می‌شوند. گیاهان از طریق ترشحات ریشه به‌منزله منبع کربن و انرژی، مواد غذایی، آنزیم‌ها و اکسیژن را برای جامعه میکروبی در ناحیه ریزوسفر تهیه می‌کنند. Reilley و همکاران (۱۹۹۶) در کاری مشابه نتایج مشابهی

جدول ۵. نتایج معادلات سینتیک درجه صفر، درجه یک و هیگوجی در گیاه‌پالایی

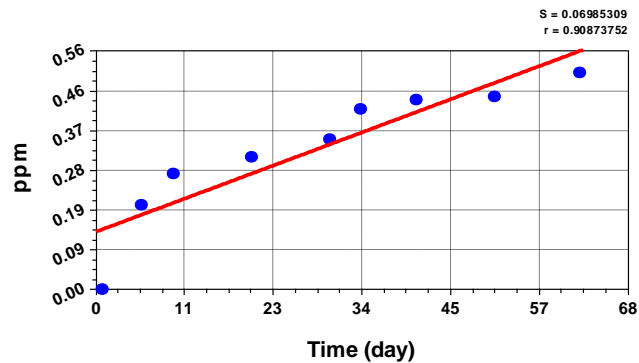
گیاه	سطوح غلظت فاضلاب	تابع سینتیک درجه اول		تابع سینتیک درجه صفر	
		شکل رابطه	R ²	S	شکل رابطه
	۵ میلی گرم در لیتر	$y = 1.975.e^{-0.00392t}$	۰/۹۳	۰/۰۶	$Y=0.134+0.0068.t$
برموداگراس	۱۰ میلی گرم در لیتر	$y = 5.895.e^{-0.00176t}$	۰/۸۸	۰/۱۲	$Y=0.382+0.0138.t$
	۱۵ میلی گرم در لیتر	$y = 11.52.e^{-0.0014t}$	۰/۷۸	۰/۲۴	$Y=0.482+0.0133.t$
	۵ میلی گرم در لیتر	$y = 2.016.e^{-0.00713t}$	۰/۹۶	۰/۰۷	$Y=0.169+0.0113.t$
نی	۱۰ میلی گرم در لیتر	$y = 5.56.e^{-0.0062t}$	۰/۹۳	۰/۲۶	$Y=0.517+0.0276.t$
	۱۵ میلی گرم در لیتر	$y = 11.14.e^{-0.0332t}$	۰/۸۳	۰/۰۵	$Y=1.01+0.0325.t$
	۵ میلی گرم در لیتر	$y = 1.99.e^{-0.0054t}$	۰/۹۴۴	۰/۰۷	$Y=0.127+0.009.t$
تیفا	۱۰ میلی گرم در لیتر	$y = 5.611.e^{-0.0033t}$	۰/۸۵	۰/۲۳	$Y=0.417+0.0162.t$
	۱۵ میلی گرم در لیتر	$y = 11.23.e^{-0.00228t}$	۰/۷۸	۰/۴۲	$Y=0.817+0.0233.t$

ادامه جدول ۵

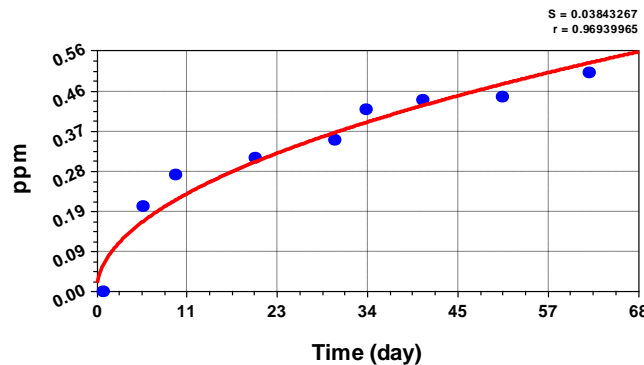
خطای استاندارد	ضریب همبستگی	تابع سینتیک هیگوچی	سطوح غلظت فاضلاب	گیاه
۰/۰۴	۰/۹۷	$Y=0.067.t^{0.5}$	۵ میلی گرم در لیتر	برمودا گراس
۰/۰۷	۰/۹۵	$Y=0.104.t^{0.5}$	۱۰ میلی گرم در لیتر	
۰/۱۸	۰/۸۶	$Y=0.17.t^{0.5}$	۱۵ میلی گرم در لیتر	
۰/۰۱۷	۰/۹۹۷	$Y=0.102.t^{0.5}$	۵ میلی گرم در لیتر	نی
۰/۱۵	۰/۹۷	$Y=0.268.t^{0.5}$	۱۰ میلی گرم در لیتر	
۰/۳۶	۰/۹	$Y=0.387.t^{0.5}$	۱۵ میلی گرم در لیتر	
۰/۰۴	۰/۹۸	$Y=0.08.t^{0.5}$	۵ میلی گرم در لیتر	تیفا
۰/۱۵	۰/۹۳	$Y=0.178.t^{0.5}$	۱۰ میلی گرم در لیتر	
۰/۳۲	۰/۸۷	$Y=0.294.t^{0.5}$	۱۵ میلی گرم در لیتر	



شکل ۲. برازش با مدل سینتیک درجه اول



شکل ۳. برازش با مدل سینتیک درجه صفر



شکل ۴. برازش با مدل توانی هیگوچی

توجه به نتایج این تحقیق و سایر مطالعات، تابع سینتیک گیاه‌پالایی می‌بایست براساس نوع گیاه، سطوح مختلف غلظت و نوع آلاینده شبیه‌سازی شود.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش، حاکی از بیان این مطلب بود که سینتیک کاهش سرب در خاک، عمدتاً تابع وابسته نمایی و پس از آن تابع هیگوچی از بهترین برازش برخوردار بود. نشان داد که این دو مدل طی کل دوره آزمایش از عملکرد و تطابق بهتری برخوردار بودند. این در حالی است که دو مدل سینتیک درجه صفر و درجه اول در زمان‌های ابتدایی و پایانی آزمایش از دقت لازم برخوردار نبودند. نتایج محاسبه زمان تعادل برای رسیدن به نصف غلظت اولیه خاک ($y/2$) نشان داد که براساس مدل سینتیک درجه اول، زمان ۳۸۴، ۱۹۰ و ۱۰۰ روز را به ترتیب در شرایط کشت برموداگراس، تیفا و نی در شرایط تیمارهای سطح متوسط غلظت نیازمند است که بیانگر این بود که گیاه نی، توان گیاه‌پالایی بیشتری نسبت به دو گونه دیگر برخوردار بود. بنابراین، غلظت بستر را در زمان کمتری به نصف غلظت اولیه سرب قابل جذب خاک می‌رساند. نتایج محاسبه ضریب ثابت سرعت واکنش نشان داد که این ضریب برای سه گونه برموداگراس، تیفا و نی در محدوده ۰/۰۰۱۴ تا ۰/۰۰۷۱ بر روز متغیر بود و در کلیه سطوح مختلف غلظت برای گیاه نی از دو گونه دیگر بالاتر بود. بنابراین، شدت

بررسی روند تغییرات سرب خاک نشان می‌دهد که سرعت کاهش سرب خاک عمدتاً در ۱۰ روز اول سریع است و پس از روز ۳۰ام به بعد، تقریباً در حد ثابتی قرار می‌گیرد. Vinas و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیقات مشابه گزارش کردند که سینتیک حذف ترکیبات آلی خاک از الگوی دوفازی تبعیت می‌کند. آن‌ها با انجام یک آزمایش ۲۰۰ روزه فرایند تخریب زیستی خاک‌های آلوده به نفت سفید را بررسی کردند. عابدی کوپایی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی توان گیاه‌پالایی ریگراس را در خاک آلوده به ترکیبات نفتی اهواز بررسی کردند و دریافتند که روند کاهش آلودگی‌ها در خاک از مدل سینتیک درجه اول تبعیت می‌کرد و ضریب ثابت واکنش (K) و نیمه عمر آلاینده‌ها به ترتیب برابر ۰/۰۰۹۸ بر روز و ۷۱ روز در شرایط کشت ریگراس به دست آمد. براساس نتایج این تحقیق پس از ۱۷ هفته پس از کاشت، بازده حذف ۶۵ درصد نتیجه‌گیری شد. در مطالعه دلایان و همایی (۱۳۸۹) زمان گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کادمیوم و مس به وسیله مریم گلی شبیه‌سازی شد. مدل ارائه شده به وسیله داده‌های آزمایشگاهی واسنجی و کارایی آن با ملاک‌های کمی آزموده شد. نتایج نشان داد که نرخ گیاه‌پالایی کادمیوم و مس به وسیله مریم گلی تابع مدل مرتبه صفر از غلظت‌های آن‌ها در خاک بود. همچنین نتایج، بیانگر کارایی بالای مدل‌های پیشنهادی با هم‌ده‌های برون جذبی خطی در برآورد زمان گیاه‌پالایی کادمیوم و مس از خاک بود. با

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد واحد دزفول به خاطر تأمین هزینه‌ها و امکانات اجرایی این تحقیق، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

یادداشت‌ها

1. Volatilization
2. Exponential Association

کاهش سرب خاک در شرایط کشت نی از سرعت بالاتری نسبت به دو گونه دیگر برخوردار بود و این ضریب ثابت در کلیه موارد با افزایش سطوح مختلف غلظت در حال کاهش بود. در پایان، نتیجه‌گیری شد که تابع سینتیک گیاه‌پالایی می‌بایست براساس نوع گیاه، سطوح مختلف غلظت و نوع آلاینده شبیه‌سازی شود.

منابع

- آفتاب‌طلب، ن. ۱۳۸۶. «بررسی توان پالایش دو عنصر سمی کادمیوم و سرب به وسیله نهال‌های دو ساله دو گونه چنار و سرو سیمین»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۳۰ ص.
- افروس، ع. ۱۳۸۹. «امکان تصفیه پساب‌های کشاورزی و صنعتی با استفاده از گیاهان آبی بومی دزفول»، رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۱۶۲ ص.
- اکبرپور، ف.، صدری، ف.، گل‌علیزاده، د. ۱۳۹۱. «گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به برخی فلزات سنگین به وسیله چند گیاه بومی منطقه حفاظت‌شده ارسباران»، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، شماره ۴، صص ۵۳-۶۵.
- پارسادوست، ف.، بحرینی‌نژاد، ب.، صفری‌سنجانی، ع. ا.، کابلی، م. م. ۱۳۸۶. «گیاه‌پالایی عنصر سرب توسط گیاهان مرتعی و بومی در خاک‌های آلوده منطقه ایران‌کوه (اصفهان)»، مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۵، صص ۵۴-۶۳.
- دلایان، م.، همایی، م. ۱۳۸۹. «شبیه‌سازی زمان لازم برای پالایش سبز خاک‌های آلوده‌شده به کادمیوم و مس به وسیله گیاه مریم‌گلی»، دانش آب و خاک، شماره ۴، صص ۱۲۱-۱۴۱.
- کاظمیان، ح. ۱۳۷۸. «آمایش پسماندهای رادیواکتیو منابع حاصل از محصولات شکافت اورانیوم طبیعی»، رساله دکترای شیمی تجزیه، دانشکده شیمی دانشگاه اصفهان.
- گودرزی، ش.، افروس، ع. ۱۳۹۱. «معادلات جذب نیکل و کادمیوم از محیط شبیه‌سازی‌شده توسط سه گونه گیاه آبی»، همایش ملی بهره‌برداری بهینه از منابع آب، ۱۰ تا ۱۲ اسفندماه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.
- عابدی کوپایی، ج.، قاهری، ا.، اسلامیان، س.، حسینی، ه. ۱۳۹۳. «بررسی مدل‌های سینتیک حذف بیولوژیکی آلودگی نفتی خاک اطراف لوله‌های انتقال نفت توسط ریگراس»، مجله آب و فاضلاب، شماره ۱، صص ۶۲-۶۸.
- خداکریمی، ی. ۱۳۸۶. «ارزیابی توان زیست‌پالایی خاک در دو گونه بلوط ایرانی و بنه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۴۶ ص.
- ملاحسینی، ح.، هراتی، م.، اکبری، غ.، حریری، ن.، عبادی، ت.، فوقی، ب.، بغوری، ا. ۱۳۸۴. «تجمع فلزات سنگین در اندام‌های ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب»، مجموعه مقالات نهمین کنگره علوم خاک ایران، ۶ تا ۹ شهریور، تهران.
- موحدیان عطار، ح.، ابراهیمی، ا. ۱۳۸۲. «ارزیابی کارایی زئولیت‌های طبیعی و رزین‌های مصنوعی در حذف یون‌های نیکل، روی و مس از

فاضلاب‌های صنعتی، مجله پژوهش در علوم پزشکی، شماره ۸، صص ۷۶-۸۰.

هاشمیان قهفرخی، ص.، لندی، ا.، خادمی، ح.، حجتی، س. ۱۳۹۳. «حذف سرب و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از کانی‌های سیپولیت و زئولیت طبیعی ایران»، فصلنامه محیط‌شناسی، شماره ۴۰ (۱)، صص ۱۸۹-۱۹۸.

یاسایی مهرجردی، غ.، عزت‌پناه، ح.، یاسینی اردکانی، ع.، دادفرنیاء، ش. ۱۳۸۹. «ارزیابی مقادیر سرب و کادمیوم در شیر خام مناطق مختلف استان یزد»، نشریه علوم غذایی و تغذیه، شماره ۷ (۳)، صص ۳۵-۴۲.

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):pp.639-645.

Gunther, T. Dornberger, U. Frische, W. 1996. Effect of ryegrass on biodegradation of hydrocarbons in soil. *Chemosphere* 33: pp.203-215.

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

Hutchinson, S. L. Banks, M.K. Schwab, A.P. 2001. Phytoremediation of aged petroleum sludge: Effect of inorganic fertilizer. *Journal of Environmental Quality* 30: pp. 395-403.

Jadia, C.D. Fulekar, M.H. 2009. Phyto-remediation of heavy metals: Recent techniques. *African Journal of Biotechnology* (6): pp. 921-928.

Machado-Estrada, B. Calderón, J. Moreno-Sánchez, J.R. and Rodríguez-Zavala, J.S. 2013. Accumulation of arsenic, lead, copper, and zinc, and synthesis of phytochelatins by indigenous plants of a mining impacted area. *Environmental Science and Pollution Research*. 20(6):pp.3946-55.

Pulford, I.D. Watson, C. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by tree: a review. *Environment International* 29: pp.529-540.

Reilley, K. Banks, M. K. Schwab, A.P. 1996. Organic chemicals in the environment: Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Journal of Environmental Quality* 25: pp.212-219.

Rostami, K. Joodaki, M.R. 2002. Some studies of cadmium adsorption using *Aspergillus niger*, *Penicillium austurianum*, employing an airlift fermenter. *Journal of Chemical Engineering* 89(1-3): 239-252.

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 Science Society of America Journal* 46: pp.265-270.

Vinas, M. Sabate, J. Espuny, M.J. Solanas, A.M. 2005. Bacterial community dynamics and polycyclic aromatics hydrocarbon degradation during bioremediation of heavily creosote-contaminated soil. *Applied and Environmental Microbiology* 71:pp.7008-7018.

Wiedemeier, T.H. Rifai, H.S. Newell, C. J. Wilson, J.T. 1999. Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface, John Wiley and Sons, New York, USA.