بررسی امکان تصفیه آب‌های آلوده به فلز روی (Zn) توسط خاک تحت کشت آفتاب‌گردان، یولاف و نی (پالایش سبز)

آرش ذامیادی* عبدالمجید لیاقت** علیرضا حسن اقلی***

(دریافت ۸۲/۶/۱۹ پذیرش ۸۲/۸/۲۵)

چکیده

امروزه خطرات ناشی از تخلیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین به محیط زیست و هم‌چنین نفوذ این آلودگی‌ها به منابع آب سطحی و زیرزمینی و گسترش آن به اراضی مجاور این منابع، به یک نگرانی ملی تبدیل شده و یافتن راه‌حل‌هایی مناسب در جهت رفع این خطرات پیش از بروز فجایع زیست‌محیطی، در بسیاری از نقاط کشور ضروری می‌باشد. در حال حاضر روش‌های متنوعی برای تقلیل آلودگی‌های آب و خاک به کار گرفته می‌شود که از آن جمله می‌توان به شست و شوی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توسط اسید یا تصفیه پساب‌های صنعتی در تصفیه‌خانه‌ها پیش از تخلیه آن‌ها اشاره نمود. اکثر این روش‌ها وقت‌گیر و پرهزینه بوده و در نهایت موجب انتقال آلودگی به بخش دیگری از محیط زیست می‌گردند. در این میان، یافتن راه حلی مطمئن که ضمن رفع آلودگی، کم هزینه و نسبتاً سریع بوده و اثرات جانبی آن سلامت محیط را تهدید ننماید، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از راه‌های رفع چنین مشکلاتی، بهره‌گیری از فرایندهای طبیعی تصفیه و از جمله پتانسیل‌های فیزیولوژیک گیاهان سبز می‌باشد.

هدف اصلی از اجرای این تحقیق، بررسی امکان تصفیه پساب‌های صنعتی و آب‌های آلوده به فلز روی توسط خاک و گیاه است. به این منظور ۹ عدد لایسیمتر زهکش‌دار استوانه‌ای شکل به قطر ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر از جنس پلاستیک تهیه و با خاک سبک و دارای بافت لوم شنی پر شدند. لایسیمترها پس از کاشت گیاهان و تا هنگام استقرار آن‌ها، با آب چاه آبیاری گردیده و سپس آبیاری با استفاده از پساب صنعتی (آب آلوده به روی به میزان ۲۵mg/L) صورت پذیرفت. در این پژوهش تأثیر کاشت گیاهانی همچون آفتابگردان، یولاف و نی در جذب روی، مورد مطالعه قرار گرفت که هر یک در سه لایسیمتر کشت شدند. به منظور بررسی توانایی مجموعه خاک- گیاه در جذب فلز روی، نمونه‌هایی از آب ورودی به لایسیمتر ها و زه‌آب خروجی از آن‌ها در تناوب‌های مناسب تهیه و آنالیز گردید. نتایج حکایت از آن داشت که غلظت روی در نمونه‌های زه‌آب جمع‌آوری شده در تمامی تیمارها زیر حد مجاز قرار گرفته که بیانگر عملکرد مطلوب مجموعه خاک- گیاه در جذب این فلز از آب آلوده (با راندمانی در حدود ۹۸/۵٪) می‌باشد. در انتهای دوره آزمایش، نمونه‌های گیاهی نیز برای تعیین میزان جذب روی از خاک تهیه و آنالیز گردید. جذب فلز توسط اندام‌های مختلف گیاهی بین ۰/۷۱۴ و ۰/۲۵۷ درصد در نوسان بود که بر پالایش گیاهی در سیستم دلالت دارد. با تعیین بیلان جرمی، در نهایت مشاهده شد که غلظت فلز روی در خاک لایسیمترها از حد مجاز غلظت این عنصر در خاک‌های کشاورزی تجاوز نموده است و این خاک‌ها شدیداً آلوده می‌باشند.

واژه‌های کلیدی : پالایش سبز، فلز روی، پساب صنعتی، آب آلوده، تحقیقات لایسیمتری.

* کارشناس آبیاری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
** استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
*** عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

Investigation into the Possibility of Phytoremediation of Industrial Wastewater Containing Zinc

Zamyadi, A., (Lecturer), College of Irrigation, Tehran University
Liaghat, A.M., Assist. Prof., College of Irrigation, Tehran University
Hassanoghlie, A.R., Lecturer, Karaj, Institute of Agricultural Research

Abstract

Intense pollution of industrial wastewater and surrounding lands and pollutants disposal into surface and ground waters, endanger our environment and our water resources. So, now a days finding solutions for this national and international concern is necessary. At current time one can use different methods to decrease the amount of pollutants in soil and water, e.g. cleaning soils contaminated with heavy metals by acids or refinement of wastewaters at treatment plants. These methods are mostly time consuming and expensive and at last they contaminate another section of surrounding environments. Therefore, finding a relatively fast and low cost technology without marginal harmful effects is vital. Using the natural processes; for example the biological potentials of green plants, is a reliable and safe solution for these problems.

The main goal of this research was to investigate the possibility of phytoremediation of industrial wastewater contaminated with zinc. In order to conduct this project nine plastic lysimenters with 60 cm diameter and 100 cm height equipped with a drain pipe at the bottom were filled by granular sandy-loam soil. Sunflower, Avena sativa and Reed (Arundo donax) were planted in these lysimeters and they were irrigated by clean water until the plants were settled up. Then the irrigation was continued by contaminated wastewater which consisted of 25 mg/l zinc. In order to evaluate the soil ability in absorbing zinc, the drain effluent was measured and analyzed. The concentration of zinc in drain effluent of all lysimeters was under the standard limits and the performance of the system in absorbing zinc was found satisfactory up to 98.5%.

مقدمه

امروزه با توجه به رشد روزافزون صنایع و آلایندگی شدید پساب‌های صنعتی و همجواری مراکز صنعتی، شهری و کشاورزی در بیشتر نقاط کشور و هم‌چنین نفوذ این آلودگی‌ها به منابع آب سطحی و زیرزمینی، در نتیجه تخلیه غیرمجاز و مصارف آبیاری و زراعی، ورود آلاینده‌ها به ویژه فلزات سنگین به خاک‌های مجاور آن‌ها به یک نگرانی ملی تبدیل شده و یافتن راه‌حل‌هایی برای رفع این خطرات پیش از بروز فاجعه‌ای زیست‌محیطی در بسیاری از نقاط کشور ضروری می‌باشد. در حال حاضر روش‌های متنوعی برای کاهش آلودگی‌های آب و خاک ابداع گردیده است که از آن جمله می‌توان به شست و شوی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توسط اسید یا تصفیه پساب‌های صنعتی در تصفیه‌خانه‌ها اشاره نمود. مجموعه این روش‌ها، وقت‌گیر و پرهزینه بوده و در نهایت موجب آلودگی بخش دیگری از محیط زیست می‌گردند. در این میان یافتن راه‌حلی مطمئن که ضمن رفع آلودگی، کم هزینه و نسبتاً سریع بوده و اثرات جنبی آن سلامت محیط را با خطر مواجه نسازد، بسیار حیاتی می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به بحران کم آبی، استفاده بهینه از آب و فاضلاب برای برخی مصارف زراعی، شهری و صنعتی تا حدودی به رفع مشکلات ناشی از کمبود آب نیز کمک خواهد کرد. بنابراین چنین به نظر می‌رسد که یکی از بهترین راه حل‌ها برای رفع چنین معضلاتی استفاده از فرایندهای طبیعی تصفیه، از جمله پتانسیل‌های فیزیولوژیک گیاهان سبز می‌باشد. با مرور تجربه کشورهای توسعه یافته که از سال‌ها پیش درگیر چنین معضلاتی بوده‌اند، مشاهده می‌شود که، پالایش پساب‌ها و خاک‌های آلوده با استفاده از گیاهان سبز، امکان پذیر بوده و نتایج مطلوبی را نیز در پی خواهد داشت. از تلاش‌های انجام شده در این گونه

کشورها به ویژه در سه دهه اخیر تحت عنوان کلی پالایش سبز[1] یاد شده است.

از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان به پالایش گیاهی مواد لاروب شده و گل‌های روان توسط لی و همکاران [۸] در سال ۱۹۷٦ اشاره نمود که غلظت فلزات سنگین را تا حدود استانداردهای سازمان مهندسی ارتش ایالات متحده کاهش داد. هم‌چنین پالایش سبز خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توسط یامادا و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۷۵به عنوان یک نمونه موفق از کاهش غلظت این فلزات در خاک‌های آلوده توسط گیاهان سبز مطرح می‌باشد. تصفیه گیاهی رواناب سطحی آلوده به ترکیبات آلی و کنترل فرسایش خاک توسط شیمپ و همکاران [۱۳] نمونه‌ای دیگر از کاربرد موفقیت‌آمیز پتانسیل‌های بیولوژیک گیاهان سبز می‌باشد. جلوگیری از جابه جایی آلاینده و حفاظت از آبراهه‌ها و خاکریزها و با استفاده از گیاهان سبز توسط مک آنی و همکاران [۱۰] و لیچ [۹] و استفاده از گیاهان مقاوم به فلزات سنگین مانند نی سرخ[2]، برای کاشت و کنترل فرسایش خاک در معادن فلز و بندآبهای بزرگ آلوده به فلزات سنگین مانند روی و سرب توسط برادشو و چادویک [۵] و نیز اصلاح مواد لاروب شده اسیدی و آلوده به فلزات سنگین با استفاده از گیاهان سبز توسط براندون و همکاران [٦] نمونه‌های دیگری از کاربری‌های گیاهان سبز در پالایش محیط‌های آلوده به فلزات سنگین می‌باشد. هم‌چنین استفاده موفقیت‌آمیز از گیاهان با ظرفیت ذخیره بالا[3] برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلز توسط یامادا و همکاران [۱۵] و ارنست در سال ۱۹۹۸ [۷] در نهایت به معرفی این گونه گیاهان انجامیده و توجه محققین را به تولید ژنتیکی این گونه گیاهان جلب نمود. کشت نیزار در سطحی پر از آب آلوده به فلزات سنگین به منظور حذف آلودگی با استفاده از قدرت جذب نی (نوعی علف مرداب)، توسط مرکز تحقیقات توسعه پایدار شرکت شل در صحرای عمان در سال ۲۰۰۲ [۱] نیز به عنوان یک تحقیق مشابه و در حال اجرا قابل بررسی می‌باشد.

نکته اصلی در این قبیل فعالیت‌ها انتخاب گیاهانی است که ضمن پالایش پساب‌ها و خاک‌های آلوده، امکان تکمیل دوره رشد آن‌ها در شرایط آلودگی نیز وجود داشته باشد. امروزه همواره سعی بر آن است تا در حد امکان از گیاهان بومی و محلی برای این منظور استفاده شود، چرا که امکان پرورش و تطابق گیاهان سایر سرزمین‌ها با شرایط سرزمین مقصد با توجه به محیط رشد نامطلوب این گیاهان در پساب‌های آلوده بسیار دشوار است. در ضمن پراکندگی گونه‌های مختلف گیاهی در نقاط مختلف کره زمین، چنین الزاماتی را به کمترین حد ممکن کاهش می‌دهد. بنابراین تمرکز فعالیت‌های تحقیقاتی روی گونه‌های گیاهی سرزمین ایران، و انتخاب گونه‌های مناسب و با کارایی بالا در حذف آلاینده‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که تحقیقات انجام شده در این زمینه در ایران اندک بوده و اطلاعات موجود در مراکز علمی در خصوص پتانسیل جذب گیاهان بومی ایران از نظر فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌ها بسیار محدود می‌باشد. لازم به ذکر است که چگونگی استفاده از گیاهان مورد استفاده در این روش یا حذف آن‌ها پس از برداشت، با توجه به آلودگی این گیاهان به فلز مورد مطالعه حائز اهمیت می‌باشد. روش‌های متعددی از مصرف این گیاهان به عنوان علوفه و غذای انسان در صورت تطابق با استانداردهای تغذیه، تا سوزاندن بقایای گیاهی و حتی بازیافت فلزات از اندام‌های گیاهی پیشنهاد شده و مورد مطالعه می‌باشند، که در بسیاری موارد هنوز نتایج قطعی تحقیقات مشخص نشده است.

با توجه به ضروریات فوق، این پژوهش به منظور نیل به اهداف زیر انجام گرفته است:

۱- بررسی و تعیین میزان جذب فلز روی به عنوان آلاینده‌های شاخص توسط خاک از آب

۲- بررسی عملکرد گیاهان آفتابگردان، یولاف و نی در جذب فلز روی از خاک.

مواد و روش‌ها

برای بررسی میزان جذب فلز توسط خاک و گیاه، ابتدا به محیط کاشت کنترل شده‌ای احتیاج است تا امکان جمع‌آوری نمونه‌های آب و زه‌آب مورد نیاز و اندازه‌گیری پارامترهای مد نظر به دقت فراهم گردد. به این منظور ۹ عدد لایسیمتر از جنس پلاستیک تهیه شد. این لایسیمتر ها

---

[1] Phytoremediation
[2] Festucarubra
[3] Hyperaccumulator

به صورت استوانه‌ای شکل و دارای قطر ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر بوده که روی سکوهایی مستقر شدند. به منظور خروج آب از بخش تحتانی هر لایسیمتر، لوله‌ای از جنس PVC به قطر ۵ سانتی‌متر در نزدیکی کف لایسیمتر نصب گردید که حدود یک سوم طول لوله که فاقد روزنه می‌باشد، از دیواره آن خارج می‌شود. بر روی لوله زهکش و در چهار جهت با استفاده از مته‌ای به قطر ۲ میلی‌متر روزنه‌هایی به فاصله ۳ سانتی‌متر ایجاد شد. سپس به منظور ممانعت از ورود ذرات خاک به درون لوله زهکش، تمامی طول لوله که در داخل لایسیمتر قرار گرفت با استفاده از فیلتر ژئوتکستایل[1] مناسب پوشانده شد. ضمناً محل خروج لوله از لایسیمتر به وسیله چسب اکواریوم از داخل و خارج آب‌بندی گردید. در این پژوهش از خاک سبک دارای بافت لوم شنی با ۵۴/۷٪ ماسه، ۲۸/۵٪ سیلت و ۱۶/۸٪ رس برای کاشت گیاهان استفاده شد. به منظور تأمین تراکم مناسب خاک پس از پرشدن یک سوم حجم لایسیمتر خاک اشباع و سپس آب ثقلی آن تخلیه شد. پس از زهکشی شدن آب ثقلی، پرنمودن لایسیمتر ها تا رسیدن ارتفاع خاک به دو سوم ارتفاع کل لایسیمتر ادامه یافت و خاک به روشی که در قبل ذکر شد، متراکم گردید. این کار تا پرشدن لایسیمتر ها از خاک ادامه یافت.

پس از آماده شدن تمامی لایسیمتر ها، گیاهان آفتابگردان، یولاف و نی هر کدام در سه لایسیمتر به صورت بلوک‌های تصادفی کشت گردید. بجز آفتابگردان که بذر آن کشت شده، بوته دو گیاه دیگر (یولاف و نی) همراه با ریشه از اطراف زهکش‌های مزرعه دانشکده کشاورزی کرج تهیه و به لایسیمتر ها انتقال یافت. بذر گیاه آفتابگردان در تاریخ ۱۳۸۱/۲/۱۷ در لایسیمتر های مورد نظر کشت گردیدند. بوته‌های یولاف و نی نیز در تاریخ ۱۳۸۱/۲/۳۱ منتقل و کشت گردید. به منظور استقرار گیاهان یولاف و نی و تا مرحله چهاربرگی شدن آفتابگردان (۱۳۸۱/۳/۱۹)، تمامی لایسیمتر ها با آب معمولی آبیاری شد. ضمناً پیش از شروع آزمایش، نمونه‌ای از آب چاه توسط آزمایشگاه آب، خاک، فاضلاب مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی آنالیز گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه گردیده است. سپس از تاریخ ۱۳۸۱/۳/۲۰ تا ۱۳۸۱/۵/۱۸ آبیاری با آب حاوی فلز روی انجام شد و پس از آن یعنی تا تاریخ ۱۳۸۱/۶/۲۵ به دلیل ظهور آثار پژمردگی در گیاهان (احتمالاً ناشی از سمیت فلز روی) سه آبیاری بعدی با آب چاه صورت گرفت.

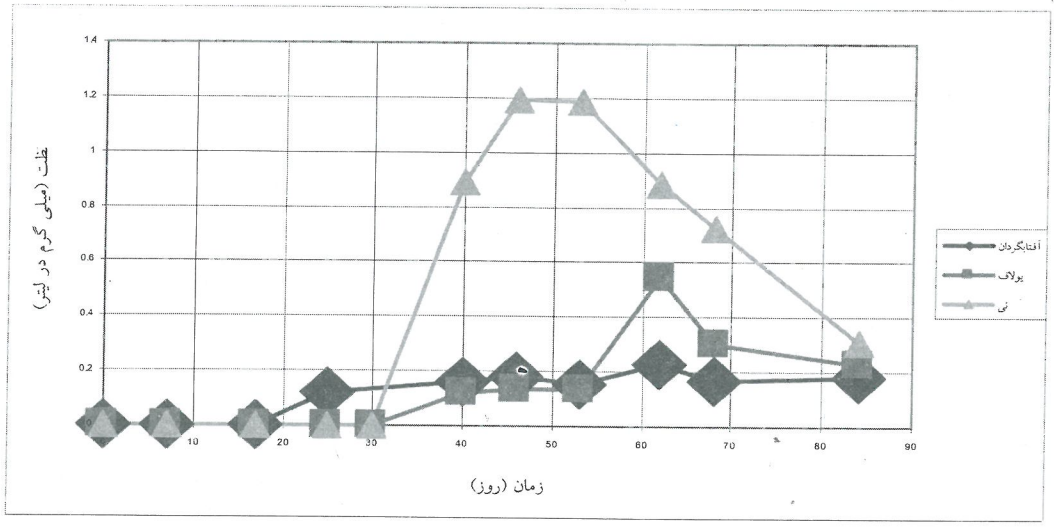
[1] Geotextile

جدول ۱- نتایج آنالیز آب چاه

پارامتر اندازه‌گیری شده	نتیجه آنالیز	واحد اندازه‌گیری
EC	۰/۶۶۰	dS/m
PH	۷/۵۱۰	-
CEC	۱۵	-
Na	۱/۶۹۰	meq/lit
Ca	۳/۰۰۰	meq/lit
Mg	۴/۰۰۰	meq/lit
K	۰/۰۰۰	meq/lit
Cl^-	۱/۹۸۰	meq/lit
HCO_3^-	۳/۲۵۰	meq/lit
SO_4^{2-}	۲/۸۶۰	meq/lit
Zn	۰/۰۱۲	mg/lit
Cu	۰/۰۰۰	mg/lit
Pb	۰/۰۰۰	mg/lit

جدول ۲- مقادیر کمینه و بیشینه فلز روی اندازه‌گیری شده در نهر فیروزآباد (میلی‌گرم در لیتر)

فلز سنگین	کمینه	متوسط	بیشینه	تعداد نمونه‌ها
روی	۰/۰۵۶	۱/۱۹	۱۳/۱۳	۵۰



نمودار ۱- متوسط غلظت فلز روی در زه‌آب خروجی از زهکش لیسیمترهای تحت کشت گیاهان آفتابگردان، یولاف و نی

برای تهیه آب آلوده، سولفات روی به مقدار مورد نیاز در آب معمولی حل شد. میزان آلودگی موجود در آب براساس دو برابر بیشینه غلظت یافت شده فلز روی در نهر فیروزآباد در جنوب شهر تهران انتخاب گردید. نتایج آنالیز شیمیایی آب نهر فیروزآباد از نظر غلظت روی و نوسانات آن در طول سال، در جدول ۲ مشاهده می‌شود. بر این اساس غلظت فلز روی در آب آلوده تهیه شده برای آبیاری لایسیمتر ها برابر با ۲۵mg/l در نظر گرفته شد.

از آنجا که فاضلاب به طور پیوسته تولید می‌شود، روند منطقی کار چنین ایجاب می‌کند که کاربرد آب آلوده به طور پیوسته صورت گیرد. ولی به دلیل سطح کم لایسیمترها و مشکلات اجرایی، آبیاری لایسیمتر ها با آب آلوده با تناوب یک روز در میان صورت گرفت و در هر آبیاری، به هر لایسیمتر ۱۶ لیتر آب داده شد. لازم به ذکر است که به منظور تأمین زمان ماندابی لازم در گیاهان نی و یولاف، زهکش لایسیمتر هایی که گیاهان مذکور در آن‌ها کشت شده بود، تا ظهر روز بعد از هر آبیاری بسته می‌شد و سپس برای تهویه خاک مجدداً باز می‌گردید. در فاصله ۳، ۱۰، ۲۰، ۲۸، ۳۳، ۴۳، ۴۹، ۵۶، ۶۵، ۷۱ و ۸۹ روز از آغاز نخستین آبیاری با آب آلوده به فلز روی، از زه‌آب خروجی از تمامی لایسیمتر ها با گذاشتن ظروف ۰/۲ لیتری در زیر زهکش آن‌ها نمونه‌برداری شد. هم‌چنین متوسط زه‌آب خروجی از هر لایسیمتر در فاصله دو آبیاری حدود ۸ لیتر اندازه‌گیری شد. غلظت فلز روی در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی آنالیز شده و به تفکیک هر یک از گیاهان کشت شده در لایسیمتر ها تعیین گردید.

به منظور تعیین مقادیر اولیه فلز روی موجود در خاک، پیش از شروع آبیاری با پساب آلوده، از خاک لایسیمتر ها نمونه‌برداری شد و میزان روی موجود در خاک تعیین گردید. هم‌چنین پس از خاتمه عملیات آبیاری و فصل کشت، از خاک تمامی لایسیمتر ها تا عمق ۳۰ سانتی‌متر نمونه‌هایی تهیه شد و میزان تجمع فلز روی در آن‌ها اندازه‌گیری شد. به منظور تهیه عصاره خاک برای اندازه‌گیری فلز روی، ابتدا محلولی مرکب از ۱۹۲/۵ گرم آمونیوم استات، ۱۲۵ میلی‌لیتر اسید استیک خیلی سرد و ۲۹/۲۲۵ گرم EDTA تهیه و در ۳ لیتر آب مقطر حل شد. بیست گرم خاک از هر نمونه تهیه و همراه با ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول مذکور به مدت ۳۰ دقیقه توسط شیکر به هم زده شد. پس از آن با عبور نمونه‌ها از کاغذ صافی واتمن ۴۰، عصاره خاک تهیه گردید و با استفاده از دستگاه جذب اتمی، میزان غلظت فلز موجود در عصاره تعیین شد[۴].

برای تعیین میزان جذب فلز روی، توسط سه گیاه آفتابگردان، یولاف و نی، نمونه‌هایی در انتهای فصل از تمامی لایسیمتر ها تهیه شد. به این منظور در آفتابگردان، از ریشه، ساقه، برگ و دانه و در یولاف و نی از ریشه و اندام هوایی بوته‌ها نمونه‌های مورد نیاز به صورت جداگانه جمع‌آوری شد و به مدت ۲٤ ساعت در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. پس از توزین و آسیاب نمونه‌های گیاهی خشک شده، غلظت فلز در کلیه نمونه‌ها توسط آزمایشگاه تغذیه در گروه علوم دامی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران تعیین شد.

نتایج و بحث

نمودار ۱ متوسط غلظت روی را در زه‌آب خروجی از زهکش برای سه نوع گیاه آفتابگردان، یولاف و نی نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشخص است غلظت روی در طول دوره آزمایش همواره کمتر از مقدار مجاز ارائه شده در استاندارد FAO و هم‌چنین استاندارد EPA (۲۰mg/l) می‌باشد [۱۱، ۱۲]. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود غلظت روی در زه‌آب خروجی از کلیه لایسیمتر ها تا ٦۳ روز روندی افزایشی را نشان می‌دهد و بعد از آن با توقف مصرف آب آلوده و استفاده از آب چاه از روندی کاهشی برخوردار بوده است. با توجه به کل نمودار و روند تغییرات غلظت روی در زه‌آب خروجی از لایسیمتر ها، درجه تأثیر پالایندگی گیاهان به ترتیب اهمیت، آفتابگردان، یولاف و نی ارزیابی می‌گردد. زیرا عملاً روی توسط گیاه آفتابگردان به میزان زیادتری در مقایسه با سایر گیاهان جذب شده است. لازم به یادآوری است که غلظت روی در آب آلوده مصرفی در این آزمایش حدوداً دو برابر غلظت یافت شده در فاضلاب جاری در نهر فیروزآباد بوده است، بنابراین در صورت استفاده از آب جاری چنین نهری قطعاً حصول نتایج مطلوب‌تر قابل تصور خواهد بود.

لذا با عنایت به میزان غلظت فلز مورد مطالعه در زه‌آب لایسیمتر ها که در کلیه موارد زیر حد استاندارد واقع شد، می‌توان از چنین مجموعه‌ای از خاک و گیاه برای پالایش پساب‌های آلوده به فلز روی استفاده نمود. لیکن ذکر این نکته ضروری است که تداوم اجرای تحقیق در سال‌های آتی، نتایج دقیق‌تری را در این خصوص و هم‌چنین تعادل نهایی سیستم، به دست خواهد داد.

به منظور نتیجه‌گیری علمی و دقیق‌تر، تعیین بیلان جرمی فلز روی در سیستم آب، خاک و گیاه در شرایط آزمایش در دستور کار قرار گرفت. لذا با داشتن حجم آب آبیاری به کار برده شده و حجم زه‌آب خروجی از زهکش لایسیمتر ها، میزان جرم ورودی و خروجی با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

$$M = V \times C \qquad (۱)$$

که در این رابطه :

M : میزان جرم فلز وارد شده یا خارج شده به هر لایسیمتر (میلی‌گرم)

V: حجم آب ورودی به هر لایسیمتر در هنگام آبیاری و یا خروجی از زهکش آن (لیتر)

C : متوسط غلظت فلز روی در آب ورودی یا زه‌آب خروجی لایسیمتر (میلی‌گرم بر لیتر)

نتایج محاسبات بالا در جدول ۳ ارائه شده است. همان گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، هر سه مجموعه خاک- گیاه انتخاب شده در مدت اجرای این تحقیق، در بدترین شرایط قادر به جذب بیش از ۹۸/۵٪ روی موجود در آب آلوده بوده‌اند. هم‌چنین غلظت فلز در زه‌آب خروجی از لایسیمتر ها در تمامی طول دوره آزمایش از حد استاندارد تجاوز ننموده است. با توجه به دوره سه ماهه این پژوهش و در شرایط اجرای آن و با در نظر گرفتن غلظت‌های اندازه‌گیری شده، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد سیستم در محدوده شرایط آزمایش در حذف فلز روی مطلوب بوده و هم‌چنین امکان استفاده اقتصادی از زه‌آب تصفیه شده برای آبیاری سایر اراضی وجود دارد؛ به گونه‌ای که اگر در هر مزرعه با خاک لومی، سطحی برای این سیستم اختصاص داده شود، با احتساب یک متر در روز به عنوان هدایت الکتریکی خاک، امکان استحصال روزانه ۱۰۰۰۰ مترمکعب پساب تصفیه شده وجود دارد. اگر تبخیر متوسط روزانه را حدود ۷ میلی‌متر در نظر بگیریم، می‌توان حدوداً ۱۵۰ هکتار زمین زراعی را با آب تصفیه شده آبیاری نمود. در نتیجه کمتر از یک درصد (۰/۷٪) سطح مزرعه برای این سیستم کافی به نظر می‌رسد. البته نتیجه‌گیری قطعی در این خصوص منوط به تداوم اجرای آزمایش‌ها در درازمدت می‌باشد.

به منظور تعیین میزان جذب فلز روی توسط گیاهان کشت شده و بهره‌گیری از آن در بیلان جرمی در سیستم خاک، آب و گیاه نمونه‌هایی از اندام‌های مختلف گیاهی تهیه و آنالیز گردید که نتایج به دست آمده در جدول‌های ٤ و ٥ ارائه شده است.

جدول ٤ میزان جذب را بر حسب میلی‌گرم به ازای هر کیلوگرم ماده خشک نشان می‌دهد. به منظور بررسی امکان استفاده از گیاهان مورد مطالعه برای مصارف صنعتی و علوفه‌ای، مقادیر جدول ٤ با حد مجاز فلزات برای مصارف فوق مقایسه گردید. با توجه به حدود استاندارد سی- ای- بی اینترنشنال[1] برای تراکم فلز روی که برای مصرف علوفه ۱۰۰۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم ماده خشک ارائه شده [١٤]، و با در نظر گرفتن مقادیر اندازه‌گیری شده، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که می‌توان از گیاهان نی و یولاف به عنوان علوفه استفاده نمود.

جدول ٥ بیلان جرمی فلز روی را به صورت کلی در مجموعه خاک- گیاه- آب آبیاری و درصد جذب گیاهی اتفاق افتاده در طول دوره کشت را نشان می‌دهد. همان گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، گیاه آفتابگردان درصد جذب بالاتری از فلز روی را در مقایسه با دو گیاه دیگر از خود نشان می‌دهد. البته این امر می‌تواند در نتیجه جذب بیشتر آب توسط این گیاه پهن برگ نسبت به دو گیاه دیگر باشد. پس از آفتابگردان، نی و در مرتبه بعدی یولاف قرار گرفته است. علت جذب بیشتر فلز توسط گیاه نی نسبت به گیاه یولاف را می‌توان در حجم بسیار زیاد ریزوم‌های نی و نفوذ آن‌ها به اعماق لایسیمترها، جستجو کرد. هم‌چنین به منظور بررسی آماری، درصد جذب این فلز توسط گیاهان کشت شده با استفاده از توزیع آماری t-text با یکدیگر مقایسه گردید که نتایج آزمون تفاوت

[1] CAB international

جدول ۳- متوسط بیلان جرمی فلز روی در لایسیمترها و بازده حذف آن توسط سیستم خاک-گیاه

نی			یولاف			آفتابگران		
درصد حذف روی	جرم خروجی (mg)	جرم ورودی (mg)	درصد حذف روی	جرم خروجی (mg)	جرم ورودی (mg)	درصد حذف روی	جرم خروجی (mg)	جرم ورودی (mg)
۹۸/٦٦	١٦٠/٨٤	١٢٠٠٩/٠٢	۹۹/٦٠	٤٨/٠٦	١٢٠٠٩/٠٢	۹۹/٦٦	٤٠/٨٣	١٢٠٠٩/٠٢

جدول ٤- میزان روی جذب شده توسط گیاهان

اندام گیاه	وزن ماده خشک (kg)	روی (mg/kg)	جرم فلز جذب شده توسط اندام گیاه (mg)
آفتابگردان			
دانه	۰/۰۹۲	۸۲/۲	۷/٥٦۲
برگ	۰/۰۷٦	۱۰۱/۰	۷/٦۷٦
ساقه	۰/٥۷٦	۹۲/٥	٥۳/۲۸۰
ریشه	۰/۱۱۲	۱٥۰/۰	١٦/۸۰۰
یولاف			
اندام هوایی	۰/۲٤۹	۲٥/۰	٦/۲۲٥
ریشه	۰/۰٦٥	۳۷۸/۰	۲٤/٥۷۰
نی			
اندام هوایی	۰/۲۳٦	۷٥/۰	۱۷/۷۰۰
ریشه	۰/۲٤۸	۱٤۷/۰	۳٦/٤٥٦

جدول ۵- بیلان جرمی عناصر در سیستم خاک، آب و گیاه و درصد جذب گیاهی به وقوع پیوسته

گیاه	جرم نهایی فلز موجود در خاک (mg)	جرم فلز جذب شده توسط گیاه (mg)	جرم فلز روی خروجی به همراه زه‌آب (mg)	جرم کلی فلز آلاینده در خاک و در انتهای فصل کشت (mg)	میزان فلز وارد شده به خاک در طول دوره توسط آب آبیاری (mg)	مقدار فلز موجود در خاک اولیه (mg)	درصد جذب گیاهی
آفتابگردان	۱۱۹۵۵/۹۹۷	۸۵/۳۱۸	۴۰/۸۳۴	۱۲۰۸۲/۱۴۹	۱۲۰۰۹/۰۲۴	۷۳/۱۲۵	۰/۷۱۴
یولاف	۱۲۰۰۳/۲۹۹	۳۰/۷۹۵	۴۸/۰۵۵	۱۲۰۸۲/۱۴۹	۱۲۰۰۹/۰۲۴	۷۳/۱۲۵	۰/۲۵۷
نی	۱۱۸۶۷/۱۵۴	۵۴/۱۵۶	۱۶۰/۸۳۹	۱۲۰۸۲/۱۴۹	۱۲۰۰۹/۰۲۴	۷۳/۱۲۵	۰/۴۵۶

معنی‌داری (در سطح یک درصد) را بین سه گیاه آفتابگردان، یولاف و نی نشان می‌دهد. بنابراین طبق نتایج این آزمون آماری می‌توان گیاهان مورد مطالعه را از نظر توانایی در جذب فلز روی به ترتیب: آفتابگردان با بیشترین درصد جذب، نی و یولاف با کمترین درصد جذب، طبقه‌بندی نمود.

با توجه به جدول‌های ۳ و ۵ مشاهده می‌گردد که حدود ۹۹ درصد فلز روی توسط خاک تحت کشت گیاهان مختلف جذب شده است. فلزات سنگین به ویژه در خاک‌های آهکی و معدنی حلالیت کمی دارند، لذا تجمع این عناصر بیشتر در لایه‌های فوقانی خاک صورت می‌گیرد. گزارش‌های بسیاری نشان داده است که فلزات سنگین فاضلاب بیشتر در لایه ۱۰ سانتی‌متری بالای خاک تجمع می‌یابند [۲]. در کاربرد فاضلاب در خاک‌های لوم شنی دیده شده است که تقریباً ۹۰ درصد عنصر روی در لایه صفر تا ۱۵ سانتی‌متری باقی مانده است [۲]. هم‌چنین عوامل متعددی بر ظرفیت خاک در نگهداری فلز روی موثرند که از آن جمله می‌توان به CEC و pH خاک اشاره کرد. در حالت عادی میزان جذب روی توسط خاک با افزایش CEC خاک، زیادتر خواهد شد [۲]. با اندازه‌گیری غلظت فلز روی در خاک لایسیمتر ها و در خاتمه آزمایش، تعیین درجه آلودگی و بررسی امکان ادامه کشاورزی در این قبیل خاک‌ها با توجه به حدود مجاز غلظت عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی، میسر نمی‌باشد. به این منظور از حدود مجاز پیج و ویلیامز ۹۲ و ۱۹۸۲ برای تعیین میزان آلودگی خاک‌های مورد مطالعه استفاده شده است [۳]. همان گونه که در جدول ٦ ملاحظه می‌گردد، غلظت فلز روی در تمامی موارد از حد مجاز بیشینه تجاوز نموده است. بنابراین با توجه به آلودگی خاک درون لایسیمتر ها به فلز روی، ادامه آبیاری با آب معمولی و کاشت گیاهان فوق‌الذکر تا کاهش غلظت این فلز به زیر حد مجاز برای خاک‌های کشاورزی توصیه می‌گردد.

در کل نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که امکان استفاده از سیستم‌های خاک و گیاه در پالایش پساب‌های صنعتی آلوده به فلز روی وجود دارد و می‌توان از پالایش سبز به عنوان یک راه حل طبیعی و ارزان قیمت برای حذف این فلز از پساب‌های آلوده استفاده نمود. نکته حائز اهمیت این که بهتر است مدت زمان اجرای پژوهش‌هایی از این دست طولانی مدت بوده تا شرایط کاهش غلظت روی به زیر حدود مجاز و بررسی میزان نهایی فلز جذب شده توسط گیاهان در فصول بعدی زراعی، تعیین گردد.

جدول ٦- حد مجاز فلز روی در خاک [۳] و مقایسه آن با میزان آلودگی مشاهده شده در خاک لایسیمترها

گیاه	حدود پیج و ویلیامز*		غلظت نهایی فلز در خاک (خاک mg/Kg)
	بیشینه	کمینه	
آفتابگردان	۱	۰/۵	۴۰/۸۷۵
یولاف	۱	۰/۵	۴۱/۰۳۷
نی	۱	۰/۵	۴۰/۵۷۱

* این حدود بر حسب میلی‌گرم روی در هر کیلوگرم خاک بیان شده‌اند

مراجع

۱- بخش امور خارجی شرکت شل دولوپمنت ایران ب.و.، (۱۳۸۱). "پیش به سوی توسعه پایدار". گزارش شرکت‌های اکتشاف و تولید شل. w.w.w. siep. shell. com

۲- حسن اقلی، ع.ر.، (۱۳۸۱). "استفاده از فاضلاب‌های خانگی و پساب تصفیه‌خانه‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی"، رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته علوم و مهندسی آبیاری از دانشگاه تهران.

۳- غازان شاهی، ج.، (۱۳۷٦). "آنالیز خاک و گیاه"، ناشر خود مولف.

٤- ملکوتی، م.ج، همایی، م.، (۱۳۷۳). "حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک مشکلات و راه‌حل‌ها"، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.

5- Bradshaw, A.D., and M.J. Chadwich. (1980). "*The Restoration of Land: The Geology and Reclamation of Derelict and Degraded Land*", Univ. California Press, Berkeley.

6- Brandon, D.L., Lee, C.R. Simmers, J.W. and J.G Skogerboe, (1991). "*Long-term Evaluation of Plants and Animals Colonizing Contaminated Estuarine Dredged Material Placed in both Upland and Wetland Environments*", Miscellaneous Paper, D-91-5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg MS.

7- Ernst, W.H.O., (1988). "*Decontamination of Mine Sites by Plants: An Analysis of the Efficiency*", P 305-310, In Proceedings of international Conference on Environmental Contamination, CEP Consultants, Ltd., Edindurgh, UK.

8- Lee, C.R., Hoeppel, R.E., Hunt, P.G., and C.A. Carlson, (1976). "*Feasibility of Functional use of Vegetation to Filter, Dewater, and Remove Contaminates from Dredged Material*", Technical Report, D-76-4 (June), US. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

9-Licht, L.A. (1993). "*Ecolotree Cap: Densely Rooted Trees for Water Management on Landfill Covers*", In Proceeding of the Air and Waste Management Association's, 86th Annual Meeting and Conference, July 14-18, Denver CO-WA-89, Paper A549. AWMA, Pittsburgh, PA.

10- McAneny, C.C., Tucker, P.G., Mrgan, J., Lee, C.R., Kelly, M.F. and R.C. Horz, (1985). "*Covers for Uncontrolled Hazardous Waste Sites*", U.S. Gov. Print, Office. EPA/540/2-85/002.

11- National Academy of Sciences and National Acadamy of Engineering, (1972). "*Water Quality Criteria*", US Environmental Protection Agency, Washington DC, EPA-R373-033.592p.

12- Pescod, M.B., (1992). "*Wastewater Treatment and use in Agriculture*", FAO Irrigation and Drainag Paper, 47.

13- Shimp, J.F., Tracey, J.C., Davis, L. C., Lee, E., Huang, W., Erickson, L.E., and J.L. Schnoor, (1993). "*Beneficial Effects of Plants in the Remediation of Soil and Groundwater Contaminated with Organic Compounds*", CRC Critical Reviews in Environ. Scien and Tech. 23:41-77.

14- Underwood, E.J., and N.F., Suttle., (1999). "*The Mineral Nutrition of Livestock*", (3rd Edition), CAB International.

15- Yamada, K., Miyahara, K., and Kotoyori, T., (1975). "*Studies on Soil Pollution Caused by Heavy Metals Part IV: Soil Purification by Plants that Absorb Heavy Metals*"., Gamm Ken Nogyo Shienjo Hokoku, 15: 39-54.