گیاه‌پالایی خاک آلوده به سیانور توسط گیاهان غیر چوبی

امیر تائبی[1*]، کهربا جیرانی[1]، آقافخر میرلوحی[2] و علیرضا زاده بافقی[1]

(تاریخ دریافت مقاله :۸۵/۴/۲۴ ؛ پذیرش مقاله : ۸۶/۵/۹)

چکیده

برخی فرایندهای صنعتی، همچون آبکاری و استخراج طلا، سیانور مصرف می‌کنند که متعاقباً به فاضلاب این صنایع وارد می‌شود. چون ترکیبات سیانور سمی هستند، باید فاضلاب‌های حاوی سیانور قبل از تخلیه به محیط زیست، تصفیه شوند. چندین روش برای حذف یا سمیت‌زدایی سیانور وجود دارد که از متداول‌ترین آنها در عمل، زوال طبیعی سیانور، کلرینایسیون قلیایی و اکسیداسیون با پراکسید هیدروژن هستند. با توجه به مشکلات فنی و اقتصادی مرتبط با این روش‌های تصفیه، اخیراً فرایندهای تصفیه بیولوژیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در گیاه‌پالایی، از قابلیت گیاهان برای حذف آلاینده‌ها استفاده می‌شود. هدف عمده این تحقیق امکان‌سنجی و بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی توسط گیاهان غیر چوبی در امر پاک‌سازی خاک آلوده به سیانور است. آزمایش‌های این تحقیق در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. سه گیاه غیر چوبی سورگوم (به عنوان گیاه سیانوژنیک)، فستوکا با اندوفایت و فستوکا بدون اندوفایت (به عنوان گیاهان علفی) برای تصفیه خاک آلوده به سیانور استفاده شدند. آنالیز واریانس داده‌های مربوط به کاهش سیانور خاک و نیز تجمع سیانور در گیاه نشان داد که گیاه‌پالایی روش مناسبی برای پالایش خاک‌های آلوده به سیانور با غلظت کم، می‌باشد. در ضمن مشاهده شد که گیاه سیانوژنیک سورگوم در حذف سیانور خاک از راندمان بهتری نسبت به گیاهان علفی فستوکا برخوردار است، لیکن بخش قابل توجهی از سیانور خاک در بافت‌های سورگوم تجمع می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سیانور، گیاه‌پالایی، زوال طبیعی، سمیت، آلودگی خاک

مقدمه

سیانور به آنیونی گفته می‌شود که از پیوند سه‌گانه یک اتم کربن و یک اتم نیتروژن تشکیل شده است. هم‌چنین به کلیه ترکیباتی که دارای گروه CN– باشند نیز سیانور اطلاق می‌شود (۴). سیانور هم به طور طبیعی توسط برخی از باکتری‌ها، جلبک‌ها، قارچ‌ها و گونه‌های گیاهی و هم به صورت مصنوعی برای مصرف در صنایع مختلف همچون استخراج طلا و نقره، تولید مواد شیمیایی آلی، فراوری فلزات و آبکاری، تولید می‌گردد (۷ و ۱۴).

به طور کلی ترکیبات سیانور را می‌توان در دو گروه کلی ترکیبات آلی سیانوردار و ترکیبات معدنی سیانوردار تقسیم نمود. ترکیبات آلی سیانوردار که نیتریل نیز نامیده می‌شوند را می‌توان با فرمول عمومی RCN نشان داد که در آن R یک بنیان آلی

۱. به ترتیب دانشیار و دانشجویان سابق کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشیار زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amirth@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]

است. ترکیبات معدنی سیانوردارخود به سه دسته سیانور آزاد، سیانورهای ساده و کمپلکس‌های سیانور تقسیم می‌شوند. سیانور آزاد به مجموع یون سیانور (CN^-) و هیدروژن سیانید (HCN) اطلاق می‌شود که در محلول آبی نسبت آنها به pH و دمای محلول بستگی دارد. سیانورهای ساده را می‌توان با فرمول عمومی $A(CN)_x$ نشان داد که در آن A گروه آمونیوم یا یک فلز قلیایی، قلیایی خاکی یا سنگین و x ظرفیت فلز است. فرمول‌های متعددی برای کمپلکس‌های سیانور ارائه شده‌اند که از آن جمله فرمول عمومی $A_yM(CN)_x$ برای کمپلکس سیانور فلز قلیایی است که در آن A یک عنصر قلیایی و M فلز سنگین مثل آهن، مس، روی، نیکل، کادمیم و طلا و x تعداد گروه CN- و y تعداد عنصر قلیایی است. سیانور کل مجموع تمام ترکیبات سیانور است که بر حسب میلی‌گرم CN بیان می‌شود، به طوری‌که ۱ میلی‌گرم سیانور پتاسیم (KCN) معادل ۰/۴ میلی‌گرم CN، و ۱ میلی‌گرم آبی پروسیان (Prussian blue) ($Fe_4[Fe(CN)_6]_3$) معادل ۰/۵۴۵ میلی‌گرم CN است (۱، ۶، ۱۴ و ۱۵).

سیانور که در غلظت بالا یک سم قوی و فوری است، در طبیعت تحت فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قرار گرفته و بسته به محصول نهایی فرایند از سمیت آن کاسته یا افزوده می‌شود. این فرایندها عبارت‌اند از: کمپلکس و تجزیه شدن، ترسیب و انحلال ، جذب و واجذب، اکسیداسیون به سیانات، تشکیل تیوسیانات‌ها، فراریت (تبخیر)، تجزیه فتوشیمیایی، هیدرولیز و تجزیه بیولوژیکی. به طور کلی کمپلکس‌های سیانور نسبت به سیانور آزاد از سمیت کمتری برخوردارند و میزان سمیت آنها بستگی به ظرفیت آنها در آزادسازی یون سیانور دارد (۳، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۳).

استفاده از گیاه‌پالائی در امر پالایش هر سیستم آلوده‌ای که گیاه بتواند در آن رشد کند، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. این فرایند، بویژه برای تصفیه سیستم‌های آلوده‌ای که غلظت آلاینده‌های آنها کم است، بیشتر کاربرد دارد. در فرایند گیاه‌پالایی، چندین مکانیزم می‌تواند باعث تصفیه شود که عبارت‌اند از: گیاه تبدیلی (Phytotransformation)، گیاه‌تبخیری (Phytovolatilization)، زیست‌پالایی محیط ریشه (Rhizosphere bioremediation)، گیاه تثبیتی (Phytostabilization)، گیاه استخراجی (Phytoextraction) و فیلتراسیون ریشه‌ای (Rhizofiltration) (۸، ۱۰ و ۱۶).

گیاه تبدیلی به جذب و تجمع آلاینده‌های خاک و آب زیرزمینی در گیاه و متعاقباً تجزیه آنها توسط گیاه اطلاق می‌شود. در گیاه تبخیری، آلاینده‌های جذب شده توسط گیاه، با فرایند فراریت (تبخیر) وارد جوّ می‌شوند. در زیست‌پالایی محیط ریشه، ریشه گیاهان با مکانیزم‌های مختلف باعث بهبود زیست پالایی خاک در محیط ریشه می‌شوند. گیاه‌تثبیتی، به نگه‌داری خاک و رسوبات آلوده در محل توسط پوشش گیاهی و هم‌چنین ایستاکردن آلاینده‌های سمی در خاک اطلاق می‌شود. در گیاه استخراجی از گیاهان تجمع دهنده فلزی (Metal-accumulating plant) برای انتقال فلزات از خاک به ریشه و سپس به ساقه‌ها و برگ‌ها و انباشته نمودن آنها در گیاه استفاده می‌شود. فیلتراسیون ریشه‌ای به استفاده از ریشه‌های گیاه برای جذب آلاینده‌های فلزی از آب‌های سطحی یا زیرزمینی اشاره دارد. در سیستم‌های تصفیه تالاب مصنوعی (Constructed wetland)، فیلتراسیون ریشه‌ای از جمله فرایندهایی است که باعث تصفیه آب زیرزمینی آلوده یا فاضلاب می‌شود.

گرچه سیانور ماده خیلی سمی است و از پتانسیل بازدارندگی متابولیکی برخوردار است، لیکن در حدود ۲۰۰۰ گونه گیاهی، معروف به گیاهان سیانوژنیک (Cyanogenic plants)، شناخته شده‌اند که سیانور (غالباً به صورت گلوکوزیدها (Glucosides)) را به منظور دفاعی تولید می‌کنند. به علاوه، در تمام گیاهان آوندی (Vascular plants) و تعداد زیادی از جلبک‌ها و قارچ‌ها، سیانور به صورت فرآورده جانبی در سنتز هورمون، تولید می‌شود. با توجه به این که در گیاهان آنزیم‌هایی هستند که توسط سیانور صدمه می‌بینند، بنابراین، گیاهان باید از نوعی استراتژی مؤثر برای سمیت‌زدایی سیانور برخوردار باشند (۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶). علی‌رغم کاربرد ترکیبات سیانور (به خصوص سیانامیدها) در قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم در کشاورزی به عنوان کود یا علف‌کش، تا سال‌های اخیر، تحقیقاتی در مورد حد آستانه مقدار

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]

سیانوری که از خارج می‌تواند توسط گیاه جذب و سمیت‌زدایی شود، انجام نگرفت.

اخیراً مطالعات محدودی در مورد قابلیت‌ها و محدودیت‌های گیاه‌پالایی خاک و آب آلوده به سیانور صورت گرفته است. از جمله مواردی که خاک به سیانور آلوده است، سایت‌های قدیمی و فعلاً متروکه استحصال گاز شهری از ذغال سنگ است. مطالعات امکان‌سنجی پاکسازی خاک این قبیل سایت‌ها توسط گیاهان چوبی، در سایت متروکه استحصال گاز از ذغال سنگ هلت در دانمارک، در حال انجام است که تاکنون نتایج رضایت‌بخشی حاصل شده است (۵). در دو تحقیق دیگر، انتقال و متابولیزم سیانور پتاسیم و کمپلکس‌های سیانور آهن توسط درختان بید مطالعه شد و نتایج نشان داد که این ترکیبات سیانور به درخت بید منتقل و متعاقباً مورد متابولیزم گیاه قرار گرفته و فقط مقدار جزئی از سیانور در گیاه تجمع یافته است (۱۴ و ۱۵). به طور کلی در این تحقیقات مشاهده شده است که تمام درختانی که سیانور را به طور طبیعی تولید می‌کنند، برای جذب و تجزیه سیانور مناسب هستند.

هدف کلی این تحقیق، امکان‌سنجی و بررسی پتانسیل پاکسازی خاک آلوده به سیانور از طریق گیاهان غیرچوبی مثل گیاهان علفی و دانه‌ای بود. در ضمن، میزان سیانور تجمع یافته در گیاه در مقایسه با میزان سیانور تخریب شده توسط گیاه یا دیگر عوامل محیطی و جوّی بررسی شد. نتایج این تحقیق، ضمن گسترش دانش گیاه‌پالایی، می‌تواند مورد استفاده صنایع، بویژه صنایع معدنی استحصال طلا برای تصفیه طبیعی فاضلاب حاوی سیانور و نیز پاکسازی خاک سایت‌های آلوده به سیانور مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این پژوهش در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، از آذر ۱۳۸۲ لغایت مهر ۱۳۸۳ انجام گرفت. این آزمایش‌ها در قالب طرح آماری فاکتوریل کاملاً تصادفی با سه تکرار اجراگردید. در این طرح تعداد ۲۵ گلدان در هر تکرار به کار برده شد. خاک ۲۰ گلدان به سیانور آلوده شد و خاک ۵ گلدان بدون آلودگی به سیانور به عنوان شاهد به کار رفت. از خاک منطقه با بافت رس-لوم و دانه‌بندی لوم استفاده شد. در ۶ گلدان آلوده به سیانور، گیاه کاشته نشد و هدف از آزمایش این گلدان‌ها، بررسی اثر عوامل آبیاری و جوّی در کاهش مقدار سیانور خاک بود، زیرا آبیاری ممکن است به برخی فرایندهای زوال طبیعی سیانور مثل هیدرولیز یا انحلال کمک کند. عوامل جوّی نیز همچون باد، باران، نور خورشید و اکسیژن هوا موجب افزایش آهنگ فرایندهای زوال طبیعی سیانور همچون تبخیر (فراریت)، تجزیه فتوشیمیایی، اکسیداسیون شیمیایی و تجزیه بیولوژیکی می‌شود.

متغیرهای گلدان‌ها عبارت بودند از: غلظت سیانور اولیه اضافه شده به خاک (C) در پنج سطح C_1 تا C_5، عوامل تصفیه (M) با پنج سطح M_1 تا M_5 و نوع گیاه (P) با سه سطح P_1 تا P_5. شرح سطوح مختلف متغیرهای غلظت سیانور اولیه، عوامل تصفیه و نوع گیاه در جدول ۱ آمده است. مدل فاکتوریل مطالعه سیانورزدائی خاک دارای ماتریس ۴×۵ (متغیر عامل تصفیه با پنج سطح و متغیر غلظت سیانور با چهار سطح) و مدل فاکتوریل مطالعه تجمع سیانور در گیاه دارای ماتریس ۳×۴ (متغیر غلظت سیانور با چهار سطح و متغیر نوع گیاه با سه سطح) بودند. جدول ۱ ترکیب متغیرها را در دو مدل نشان می‌دهد.

در فرایند گیاه‌پالایی، انتخاب گیاه مناسب از نظر راندمان بالای کاهش آلودگی خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً گیاهان برگ گوشتی به دلیل توانایی تولید زیست توده (Biomass) فراوان و امکان برداشت مکرر آنها در سال، از جمله گیاهان موثر برای گیاه‌پالایی هستند. در این تحقیق پس از بررسی‌های لازم روی گیاهان مفید و قابل دسترسی، دو نوع گیاه فستوکا (Fescue) (علف بره مرتعی) با اندوفایت و بدون اندوفایت و سورگوم (Sorghum) (ذرت خوشه‌ای) انتخاب شدند. این دو گیاه دارای سابقه کاربرد در گیاه‌پالایی دیگر آلاینده‌ها بوده و تحمل زیادی در مقابل شرایط نامساعد دارند. در ضمن گیاه سورگوم خود یک گیاه سیانوژنیک است.

تمامی گلدان‌ها هم حجم و از جنس پلاستیکی به رنگ

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]

جدول ۱. سطوح و ترکیب متغیرها در آزمایش‌های فاکتوریل

سطوح متغیرها		ترکیب متغیرها در آزمایش‌های فاکتوریل	
نام	مشخصات	سیانورزدائی خاک	تجمع سیانور در گیاه
M_1	فستوکا با اندوفایت + آبیاری + عوامل جوی	$M_1 C_1$	$P_1 C_1$
M_2	فستوکا بدون اندوفایت + آبیاری + عوامل جوی	$M_1 C_2$	$P_1 C_2$
M_3	سورگوم + آبیاری + عوامل جوی	$M_1 C_3$	$P_1 C_3$
M_4	آبیاری + عوامل جوّی (بدون گیاه)	$M_1 C_4$	$P_1 C_4$
M_5	عوامل جوّی (بدون گیاه و آبیاری)	$M_2 C_1$	$P_2 C_1$
C_1	معادل ۱ میلی‌گرم سیانور بر کیلوگرم خاک	$M_2 C_2$	$P_2 C_2$
C_2	معادل ۲ میلی‌گرم سیانور بر کیلوگرم خاک	$M_2 C_3$	$P_2 C_3$
C_3	معادل ۴ میلی‌گرم سیانور بر کیلوگرم خاک	$M_2 C_4$	$P_2 C_4$
C_4	معادل ۸ میلی‌گرم سیانور بر کیلوگرم خاک	$M_3 C_1$	$P_3 C_1$
P_1	فستوکا با اندوفایت	$M_3 C_2$	$P_3 C_2$
P_2	فستوکا بدون اندوفایت	$M_3 C_3$	$P_3 C_3$
P_3	سورگوم	$M_3 C_4$	$P_3 C_4$
		$M_4 C_1$	
		$M_4 C_2$	
		$M_4 C_3$	
		$M_4 C_4$	
		$M_5 C_1$	
		$M_5 C_2$	
		$M_5 C_3$	
		$M_5 C_4$	

مشکی بودند. خاک مورد استفاده برای تمام گلدان‌ها از یک منبع تامین و به هر گلدان ۳ کیلوگرم خاک خشک اختصاص داده شد. خاک هر گلدان در ابتدا با سیانور پتاسیم (KCN) با غلظت مشخص آلوده شد. مرحله کاشت گیاه تمام گلدان‌ها در یک روز مشخص صورت گرفت. برای کاشت گیاه فستوکا از گیاهان قبلاً تکثیر یافته و در مورد سورگوم از بذر آن استفاده شد. در تمام مدت رشد گیاهان، گلدان‌ها به طور همزمان و هر کدام با حدود ۷۶۰ سانتی‌متر مکعب آب در هر آبیاری و با تواتر یکسان، آبیاری شدند. از هیچ‌گونه علف‌کش و کود شیمیایی استفاده نشد. در مواردی که پس از آبیاری، زه‌آب وجود داشت، بلافاصله زه‌آب به گلدان مربوطه برگردانده می‌شد. پس از گذشت ۹۸ روز از زمان کاشت، تمامی گیاهان هر گلدان همراه با ریشه آنها از خاک بیرون آورده شده و پس از خشک شدن و پودر شدن در پاکت دربسته‌ای نگه‌داری شدند. خاک هر گلدان نیز پس از خشک شدن، کوبیده و مخلوط شد تا کاملاً یک‌نواخت شود و سپس در پاکت دربسته‌ای نگه‌داری شد.

برای اندازه‌گیری سیانور کل در نمونه‌های خاک و گیاه طبق روش‌های موجود در استاندارد متد، نمونه‌ها را تقطیر نموده و سپس برای اندازه‌گیری سیانور آنها از روش رنگ‌سنجی با دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد (۱). سیانور اندازه‌گیری شده در خاک بر حسب میلی‌گرم سیانور در کیلوگرم خاک ($mg\,CN/kg\,soil$) و در گیاه بر حسب میلی‌گرم سیانور در کیلوگرم گیاه خشک ($mg\,CN/kg\,dry\,biomass$) گزارش شدند. دقت اندازه‌گیری دستگاه مورد استفاده (اسپکتوفتومتر)

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]

جدول ۲. خلاصه آماری داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سیانور موجود در خاک و گیاه پس از مرحله برداشت گیاه

پارامترهای آماری	سیانور موجود(mg/kg)		درصد سیانور موجود نسبت به مقدار اولیه	
	خاک	گیاه	خاک	گیاه
تعداد مشاهدات	۶۰	۳۶	۶۰	۳۶
بیشترین (۱۰۰ درصد)	۷/۳۱	۱۴/۳۴	۹۹/۲	۷۸/۴۱
میانه (۵۰ درصد)	۱/۴۹	۰/۰۹	۴۹/۵۸	۰/۸۰
کمترین (۰ درصد)	۰/۰۱	۰/۰۱	۲/۹	۰/۰۱
دامنه	۷/۳۰	۱۴/۳۴	۹۶/۳	۷۸/۴
میانگین	۲/۲۱	۱/۸۹	۴۸/۸۴	۱۸/۰۴
انحراف معیار	۲/۱۶	۳/۴۵	۲۷/۴۷	۲۶/۵۵

جهت تست سیانور ۰/۰۰۱ بود.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده این مطالعه با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SAS ، SPSS و Excel انجام شد. برای بررسی معنی‌داری اثر متغیرها و نیز تاثیر متقابل آنها بر راندمان حذف سیانور خاک و نیز راندمان تجمع سیانور در گیاه، از روش آماری تحلیل واریانس (ANOVA, Analysis of Variance) استفاده شد.

نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سیانور موجود در خاک و گیاه در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، راندمان حذف سیانور از خاک گلدان‌های مختلف تغییرات زیادی داشته است، به طوری‌که بیشترین مقدار سیانور کل باقی‌مانده در خاک برابر ۷/۳۱ و کمترین مقدار آن برابر ۰/۰۰۸ و میانگین آن ۲/۲۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است. بیشترین کاهش سیانور از خاک۹۹/۲ درصد و کمترین آن ۲/۹ درصد و میانگین آن ۴۸/۴ درصد است. هم‌چنین بیشترین مقدار تجمع سیانور در گیاه برابر با ۱۴/۳۴، کمترین آن برابر ۰/۰۰۱ و میانگین آن ۱/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم گیاه خشک است. بیشترین، کمترین و میانگین درصد تجمع سیانور در گیاه به ترتیب برابر ۷۸/۴۰۵، ۰/۰۰۴۵ و ۱۸/۰۴ است.

در مدل فاکتوریل سیانورزدایی از خاک، اثر دو متغیر غلظت سیانور اولیه خاک با چهار سطح C_1 تا C_4 و عوامل تصفیه با پنج سطح M_1 تا M_5 روی راندمان حذف سیانور خاک مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج تحلیل واریانس داده‌های مربوطه در جدول ۳ ارائه شده است. این تحلیل آماری در سطح اطمینان ۹۹٪ (سطح معنی‌داری ۱٪) انجام گرفت. در جدول تحلیل واریانس، عدد F محاسبه شده هر متغیر حاصل تقسیم میانگین مربعات آن متغیر بر میانگین مربعات خطا (Error mean square)، عدد F ب‌حرانی معرف عدد توزیع F در سطح معنی‌دار ۱٪ و عدد P نیز احتمال محاسبه شده است. به منظور بررسی اثر هر متغیر روی درصد حذف سیانور خاک، لازم است F محاسبه شده آن با مقدار F بحرانی آن مورد مقایسه قرار گیرد، در صورتی‌که F محاسبه شده کوچکتر از عدد F بحرانی باشد، آن متغیر اثر معنی‌داری روی راندمان حذف سیانور نداشته است و اختلاف مشاهده شده مربوط به خطاهای تصادفی است. خطاهای تصادفی شامل همه عوامل کنترل نشده همچون خطا در نمونه‌برداری و کلیه خطاهای آزمایشگاهی در اندازه‌گیری سیانور نمونه‌هاست.

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که هر دو متغیر "غلظت سیانور اولیه" و " عوامل تصفیه" و هم‌چنین اثر متقابل آنها روی راندمان کاهش سیانور خاک تاثیر معنی‌دار داشته‌اند. یعنی تغییر در غلظت سیانور اولیه خاک یا در عوامل تصفیه، تغییرات معنی‌داری را در راندمان کاهش سیانور خاک موجب خواهد شد.

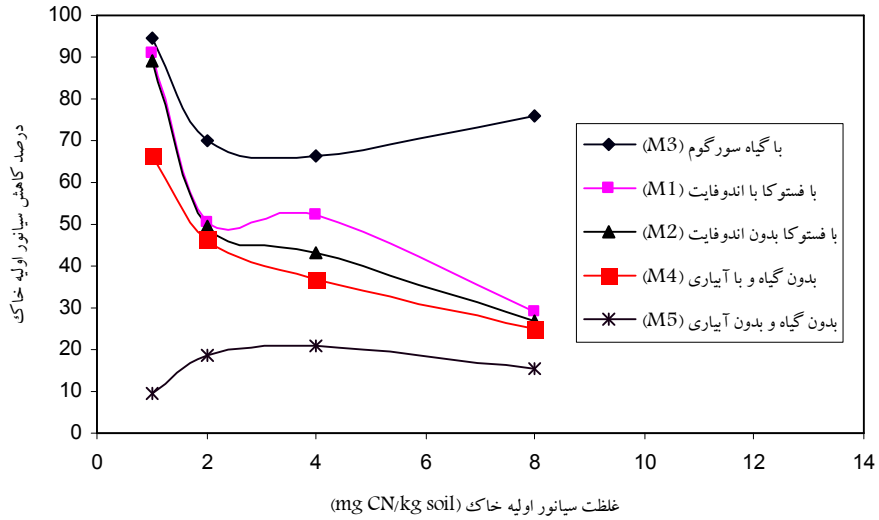
در شکل ۱، میانگین داده‌های مربوط به حالت‌های مختلف متغیرها را می‌توان مقایسه نمود. در بین غلظت‌های مختلف سیانور اولیه خاک، بیشترین راندمان کاهش سیانور در غلظت C_1 با میانگین۷۰/۱۳ درصد و کمترین آن در غلظت C_4 با میانگین

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]

جدول ۳. آنالیز واریانس درصد کاهش سیانور در خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسبه شده	F بحرانی	عدد P
مدل	۱۹	۳۹۹۵۸/۰۰	۲۱۰۳/۰۵	۱۸/۴۷	۲/۷۳	<۰/۰۰۰۱
عوامل تصفیه	۴	۲۳۲۱۸/۲	۵۸۰۴/۵۵	۵۰/۹۸	۳/۸۳	<۰/۰۰۰۱
غلظت سیانور اولیه	۳	۱۰۳۸۳/۲	۳۴۶۱/۰۷	۳۰/۴	۴/۳۱	<۰/۰۰۰۱
تصفیه × غلظت	۱۲	۶۳۵۶/۶	۵۲۹/۷۲	۴/۶۵	۲/۶۶	۰/۰۰۰۱
خطا	۴۰	۴۵۵۴/۳۶	۱۱۳/۸۶			
کل	۵۹	۴۴۵۱۲/۳۷				

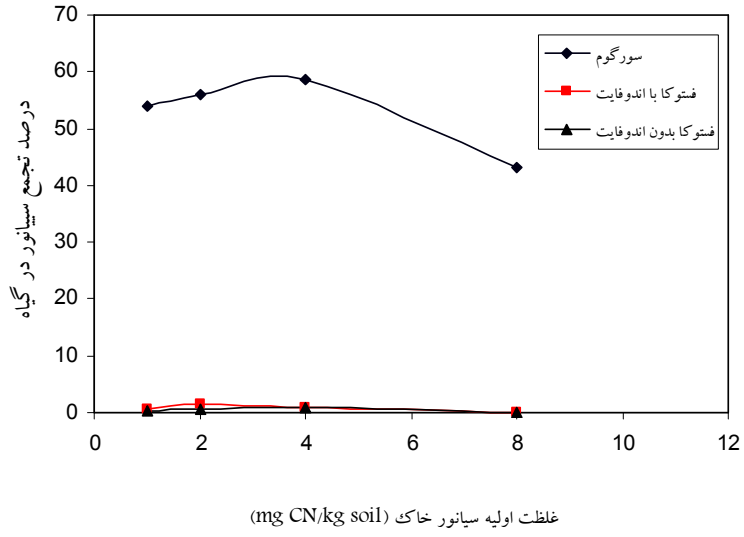


شکل ۱. درصد کاهش سیانور خاک در حالت‌های مختلف عوامل تصفیه در مقابل غلظت سیانور اولیه خاک

۳۴/۳۰ درصد اتفاق افتاده است. بنابراین هرچه غلظت آلودگی خاک بیشتر شود، راندمان حذف سیانور کاهش می‌یابد، که علت احتمالی آن مربوط به این واقعیت است که به طور کلی فرایندهای طبیعی کاهش سیانور از ظرفیت محدودی برخوردارند و در غلظت‌های آلودگی کم، مؤثرتر هستند. زیرا با افزایش میزان سیانور در خاک، اثر سمیت سیانور روی گیاه مشهود می‌گردد. هم‌چنین در بین عوامل تصفیه مختلف بیشترین راندمان حذف سیانور در M_3 (گیاه سورگوم) برابر با ۷۶/۷۴۲ درصد و کمترین مقدار آن در M_5 (بدون گیاه و آبیاری) برابر با ۱۶/۰۸۵ درصد ایجاد شده است. این نتایج نشان می‌دهد که گلدان‌هایی که در آنها گیاه کاشته شد از راندمان حذف سیانور بهتری نسبت به گلدان‌های بدون گیاه برخوردار بودند و در ضمن گیاه سورگوم نقش بهتری در گیاه‌پالایی خاک آلوده به سیانور نسبت به گیاهان فستوکا ایفا نموده است که این موضوع مربوط به سیانوژنیک بودن گیاه سورگوم است. ضمناً شکل ۱ نشان می‌دهد که در گلدان‌هایی که گیاه کاشته نشده است، عوامل دیگر همچون آبیاری و جوی باعث کاهش غلظت سیانور خاک شده‌اند. گلدان‌هایی که آبیاری شده‌اند راندمان حذف سیانور بالاتری نسبت به گلدان‌های آبیاری نشده، داشتند که این احتمالاً مربوط به افزایش فرایندهایی همچون هیدرولیز، انحلال و تبخیر است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که اثر متقابل "غلظت اولیه × عوامل تصفیه" نیز معنی‌دار است، اما تأثیر کمتری نسبت به خود متغیرهای اصلی در تغییرات راندمان حذف سیانور خاک دارد. در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که منحنی‌ها همدیگر را قطع ننموده‌اند ولی موازی همدیگر نیستند که این بدین معناست که معنی‌داری اثر متقابل دو متغیر مربوط به تقاطع اثر نیست، بلکه

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]



شکل ۲. درصد تجمع سیانور در گیاهان مختلف در مقابل غلظت سیانور اولیه خاک

مربوط به شدت اثرات در ترکیب‌های مختلف دو متغیر است. در مدل فاکتوریل تجمع سیانور خاک در گیاه، اثر دو متغیر غلظت سیانور اولیه خاک با چهار سطح C_1 تا C_4 و نوع گیاه با سه سطح P_1 تا P_3 روی درصد تجمع سیانور خاک در گیاه مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج تحلیل واریانس داده‌ها در جدول ۴ آمده است.

همان طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود فقط تغییر نوع گیاه باعث تغییرات معنی‌داری در راندمان تجمع سیانور در گیاه شده است و تغییر غلظت سیانور خاک، اثر معنی‌داری بر درصد تجمع سیانور در گیاه ندارد. ضمناً اثر متقابل "نوع گیاه × غلظت اولیه" از نظر درصد تجمع سیانور در گیاه، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد نمی‌باشد. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که هر چه غلظت سیانور اولیه خاک افزایش پیدا کند، درصد تجمع سیانور در گیاهان افزایش عمده‌ای نمی‌یابد. به بیان دیگر، ظرفیت گیاه‌پالایی محدود است و به همین علت است که فرایند گیاه‌پالایی معمولاً برای جلای تصفیه و در غلظت‌های پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از شکل ۲ ملاحظه می‌شود که در سطح آلودگی کم با افزایش غلظت سیانور اولیه خاک، درصد تجمع سیانور در گیاه افزایش اندکی یافته به طوری که بیشترین درصد تجمع سیانور در گیاه در غلظت C_3 بوده است. به نظر می‌رسد غلظت C_3، حد آستانه تحمل گیاهان بوده است و با افزایش آلودگی خاک به بیش از غلظت C_3، راندمان تجمع سیانور در گیاه به دلیل بروز اثر سمیت سیانور روی گیاهان، کاهش یافته است. در عمل مشاهده شد که گیاهان فستوکا در غلظت C_4 رفته رفته خشک شدند و از بین رفتند. این مشاهده مجدداً این واقعیت که گیاه‌پالایی روشی مناسب در پالایش خاک‌های آلوده با غلظت کم است را تایید می‌کند. هم‌چنین با مقایسه میانگین درصد تجمع سیانور در گیاهان مختلف مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار درصد تجمع در گیاه P_3 (سورگوم) با عدد ۵۲/۹۵۲ درصد و کمترین مقدار در گیاه P_2 (فستوکا بدون اندوفایت) با عدد ۰/۴۴۸ درصد بوده است.

با توجه به اصل موازنه جرم می‌وان نتیجه‌گیری نمود که آن بخش از سیانور خاک که در گیاه تجمع نیافته است، توسط دیگر فرایندهای طبیعی تخریب گشته است. از جدول ۵ استنباط می‌شود که در گلدان‌هایی که سورگوم کاشته شده است، سورگوم با بیشترین درصد تجمع سیانور در آن، نقش اصلی‌تر را در مورد حذف سیانور خاک داشته است ولی در گلدان‌هایی که فستوکا کاشته شده‌اند، درصد تجمع سیانور در گیاه نسبت به دیگر عوامل قابل ملاحظه نیست. یعنی فرایند غالب در گیاه‌پالایی سورگوم، تجمع در گیاه بوده ولی در فستوکا، دیگر فرایندها مؤثرتر بوده‌اند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]

جدول ۴. آنالیز واریانس درصد تجمع سیانور خاک در گیاه

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسبه شده	F بحرانی	عدد P
مدل	۱۱	۲۲۳۴۹/۳۴	۲۰۳۱/۷۶	۲۱/۰۴	۲/۴	<۰/۰۰۰۱
نوع گیاه	۲	۲۱۹۳۸/۶۲	۱۰۹۶۹/۳۱	۱۱۳/۶	۵/۶۱	<۰/۰۰۰۱
غلظت سیانور اولیه	۳	۱۷۰/۹۰	۵۹/۹۷	۰/۵۹	۴/۷۲	۰/۶۳
گیاه × غلظت	۶	۲۳۹/۸۱	۳۹/۱	۰/۴۱	۳/۶۷	۰/۸۶
خطا	۲۴	۲۳۱۷/۵۵	۹۶/۵۷			
کل	۳۵	۲۴۶۶۶/۸۹				

جدول ۵ . مقایسه درصد تجمع سیانور در گیاه و درصد حذف سیانور توسط عوامل دیگر

	درصد کاهش سیانور	درصد تجمع سیانور در گیاه	درصد حذف سیانور توسط عوامل دیگر
فستوک با اندوفایت	۵۵/۶۴	۰/۷۲	۵۴/۹۲
فستوکا بدون اندوفایت	۵۲/۰۸	۰/۴۵	۵۱/۶۳
سورگوم	۷۶/۷۴	۵۲/۹۵	۲۳/۷۹

نتیجه‌گیری

از اجرای این تحقیق، موارد زیر نتیجه‌گیری می‌شود:

۱. فرایند گیاه‌پالایی روشی مناسب برای پالایش خاک‌های آلوده به سیانور با غلظت آلودگی کم (برای گیاهان استفاده شده در این تحقیق، کمتر از ۴ میلی‌گرم سیانور در کیلوگرم خاک) است. افزایش میزان آلودگی خاک به بیش از حد آستانه تحمل گیاه باعث بروز جدی اثر سمیت سیانور روی گیاه و نهایتاً کاهش راندمان گیاه‌پالایی می‌شود.

۲. نوع گیاه در عملکرد فرایند گیاه‌پالایی خاک آلوده به سیانور نقش اساسی دارد و توصیه می‌شود که از گیاهان سیانوژنیک استفاده شود. در این تحقیق گیاه سورگوم که سیانوژنیک است، بهتر از فستوکا عمل نمود ولی فستوکا با اندوفایت عملکرد بهتری نسبت به فستوکا بدون اندوفایت دارد.

۳. در فرایند گیاه‌پالایی توسط گیاهان سیانوژنیک (در این تحقیق سورگوم)، غلظت سیانور در گیاه بالاست که بیانگر پدیده انتقال سیانور از خاک به گیاه و تجمع در آن است، ولی در گیاهان علفی (در این تحقیق فستوکا) میزان تجمع سیانور در زیست توده گیاه کم است و احتمالاً مکانیزم‌هایی همچون گیاه تبدیلی و زیست پالایی محیط ریشه باعث گیاه‌پالایی می‌شوند.

۴. در صورت عدم کاشت گیاهان در خاک، آبیاری خاک و عوامل جوّی باعث وقوع فرایندهای زوال طبیعی می‌شود. عملیات متناوب آبیاری منجر به افزایش سرعت فرایندهای طبیعی می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Clesceri, L.S., A.E. Greenberg and A.D. Eaton (Eds.). 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed., American Public Health Association, Washington DC.
2. Ebbs, S., J. Bushey, S. Poston, D. Kosma, M. Samiotakis and D. Dzombak. 2003. Trasport and metabolism of free cyanide and iron cyanide complexes by willow. Plant, Cell and Environ. 26: 1467-1478.
3. Fuller, W.H. 1984. Cyanides in the environment with particular attention to the soil. Proceedings of the Conference on Cyanide and the Environment. Vol. 1, Tucson, Arizona.
4. Kjeldsen, P. 1999. Behavior of cyanides in soil and groundwater: A review. Water, Air, and Soil Pollution 115(1/4): 279-308.
5. Larsen, M., S. Trapp and A. Pirandello. 2004. Removal of cyanide by woody plants. Chemosphere 54: 325-333.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]

6. Leduc, G., R.C. Pierce and I.R. McCracken. 1982. The effects of cyanides on aquatic organisms with emphasis upon freshwater fishes. NRCC No. 19246. National Research Council of Canada. Ottawa, Ontario, Canada.
7. Logsdon, M.J., K. Hagelstein and T.I. Mudder. 1999. The management of cyanide in gold extraction. International Council on Metals and the Environment, Ottawa, Ontario, Canada.
8. McCutcheon, S.C. and I.L. Schnoor. 2003. Overview of phytoremediation and control of wastes. PP. 3-58. *In*: S.C. McCutcheon and J.L. Schnoor (Eds.), Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants. Wiley-Interscience, Hoboke n, NJ.
9. Mehling, P. and L. Broughton. 1989. Fate of cyanide in abandoned tailings ponds. Proceedings of the International Symposium on Tailings and Effluent Management. Halifax, Canada.
10. Schnoor, J.L. 1997. Phytoremediation. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC), Pittsburg, PA.
11. Shifrin, N.S., B.D. Beck, T.D. Gauthier, S.D. Chapnick and G. Goodman. 1996. Chemistry, toxicology, and human health risk of cyanide compounds in soils at former manufactured gas plant sites. Regulatory Toxicol. and Pharmacol 23(2): 106 – 116.
12. Smith, A. and T. Mudder. 1991. The Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes. Mining Journal Books, London, England.
13. Smith, A.C.S. and T.I. Mudder. 1999. The environmental geochemistry of cyanide. PP. 229-248. *In:* G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (Eds.), Review in Economic Geology. Vol. 6A, Society of Economic Geologists, Littleton, CO.
14. T.W. Higgs Association Ltd. 1992. Technical guide for the environmental management of cyanide in mining. British Columbia Technical and Research Committee on reclamation, Canada.
15. Trapp, S.A.J. and H. Christiansen. 2003. Phytoremediation of cyanide-polluted soils. PP. 829-862. *In:* S.C. McCutcheon and J.L. Schnoor (Eds.), Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
16. United Nation Environment Program (UNEP). 2002. Phytoremediation: An environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation: An introductory guide for decision-makers. UNEP, International Environmental Technology Centre, Osaka, Japan.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.42.43.2]