مدل‌سازی ریاضی پالایش سبز نیکل از خاک‌های آلوده با استفاده از توابع کاهش تعرق

جهانگیر عابدی کوپایی [*]، سید سعید اسلامیان، سید یحیی هاشمی نژاد و ریحانه میرمحمدصادقی [۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۶/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۸/۱۷)

چکیده

مدل‌های پالایش سبز برای شناخت بیشتر فرآیندهای حاکم بر این پدیده و مدیریت خاک‌های آلوده از اهمیت بالایی برخوردارند. بررسی‌ها نشان داده است که تاکنون تلاش‌های اندکی برای ارزیابی پتانسیل پالایش سبز فلزات براساس مدل‌های ریاضی انجام گرفته است. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی پالایش سبز خاک آلوده به نیکل بود. بدین منظور، با استفاده از توابع کاهش تعرق نسبی و غلظت نیکل در خاک مدلی برای تعیین نرخ پالایش سبز نیکل از خاک ارائه شد. برای ارزیابی مدل، خاک با سطوح مختلفی از آلاینده نیکل آلوده شد. جهت آلوده کردن خاک از نمک نیترات نیکل استفاده شد. سپس با پر کردن گلدان‌ها با خاک‌های آلوده بذر ریحان (***Ocimum tenuiflorum* L.**) در آنها کشت گردید. بـرای دوری از **تنش رطوبتی، گلدان‌ها با فواصل زمانی کوتاه (۴۸ ساعت) توزین و تا رسیدن به رطوبتی نزدیک به‌ظرفیت زراعی آبیاری شدند. گیاهان در چهار نوبت برداشت شدند. در هر مرحله از برداشت، مقادیر تعر ق نسبی و غلظت نیکل در نمونه‌های خاک و گیاه اندازه‌گیری شد. در پایان کارآیی مدل‌ها با آماره‌های ریاضی آزموده شد. برای ارزیابی مدل‌ها، محاسبه آماره‌های خطای ماکزیمم، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین، کارایی مدل و ضریب جرم باقی‌مانده برای هر کدام از مدل‌ها انجام شد. ترسیم روند تغییرات تعرق نسبی ریحان در بازه‌های مختلف زمانی فصل رشد در** سطوح مختلف آلودگی نیکل در خاک نشان داد که در حضور آلاینده‌های فلزی در خاک تعرق گیاه کاهش یافته است. اما به‌دلیل پـایین بـودن غلظت‌های اعمال شده تغییرات چشمگیر نبوده است. نتایج حاصل از مقایسه آماره‌ها نشان داد برای برآورد تعرق نسبی ریحان در آلودگی نیکل **خاک برای تمام بازه‌های زمانی در فصل رشد، کارآیی مدل خطی (R^2= ۰/۹۴۰) تنها اندکی بهتر از مدل غیرخطی (R^2= ۰/۸۴) است. هم‌چنین، مدل حاصل از ترکیب تابع خطی و غلظت نیکل در خاک، برازش نسبتاً خوبی (R=۰/۷) با مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ پالایش سبز نیکل از خاک دارد.**

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، پالایش سبز، نیکل، تعرق نسبی، مدل‌سازی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

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

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]

مقدمه

فلزات سنگین از جمله عوامل تهدید کننده محیط زیست به‌شمار می‌روند. مهم‌ترین منابع آلودگی محیط زیست به فلزات سنگین، فعالیت‌های صنعتی مانند استخراج معادن، ذوب و آبکاری فلزات، احتراق سوخت‌های فسیلی به‌منظور تولید انرژی (وانادیم، نیکل، جیوه، سلنیم و قلع)، ضایعات شهری، فاضلاب‌های صنعتی، کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها می‌باشند(۵). علاوه بر این، با افزایش تقاضا برای آب و محدود شدن منابع آبی، پساب‌های صنعتی و پساب‌های خانگی به‌عنوان منابعی عمده اهمیت یافته‌اند که یکی از منابع ورود فلزات سنگین به محیط آب و خاک به‌حساب می‌آیند(۶، ۱۷). پاک‌سازی محیط از فلزات سنگین بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است و اغلب برای مناطق آلوده با مساحت کم که نیاز به پالایش سریع دارند، مناسب است(۱۸). پالایش سبز یا به‌عبارتی حذف آلاینده‌ها از محیط توسط گیاهان یکی از روش‌های مؤثر و اطمینان بخش نسبت به سایر فناوری‌های پاک‌سازی است که طی آن از گیاهان برای زدودن آلودگی‌ها از خاک، رسوبات، آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و اتمسفر استفاده می‌شود(۱۱، ۵). مدل‌سازی پالایش سبز در شناخت فرآیندهای حاکم در این روش نوین و بهبود کارایی آن برای مدیریت خاک‌های آلوده دارای اهمیت می‌باشد(۲۳). این مدل‌ها ضمن برآورد مقدار جذب آلاینده، پژوهشگران را در تصمیم‌گیری و مدیریت در طرح‌های پالایش یاری می‌دهند(۲). بررسی منابع نشان می‌دهد که در طول دهه‌های اخیر به‌دلایلی پرشمار از جمله پیچیدگی محیط خاک- گیاه – اتمسفر مدل‌های ریاضی و یا مکانستیک ساده و کارآمدی در این مورد توسعه نیافته است (۱۷). لیکن بیشتر مدل‌هایی که در زمینه پالایش سبز انتشار یافته‌اند برگرفته از مدل‌های جذب املاح و عناصر غذایی توسط گیاهان بوده که به‌دلیل پیچیده بودن و اندازه‌گیری‌های دشوار پارامترها و عوامل لحاظ شده در این مدل‌ها،کارایی چندانی ندارند(۱۰، ۱۴، ۱۹ و ۲۲). بنابراین برای شناخت، مدیریت و گسترش فناوری نوپای پالایش سبز، ایجاد مدل‌هایی ساده و کارآمد که تا حد امکان از پیچیدگی‌های موجود کاسته و بر ورودی‌ها و خروجی‌ها استوار باشند، بسیار ضروری است(۱).

تئوری مدل

جذب آب در گیاهان را می‌توان با استفاده از معادله کلی جریان به‌صورت کمی بیان کرد(۲۰):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left\{\frac{\partial h}{\partial z}+1\right\}\right]-S(z,t) \qquad [1]$$

که در آن θ رطوبت حجمی خاک، t زمان، z عمق، K هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک، h پتانسیل ماتریک و S مقدار آب جذب شده به‌وسیله ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان است. برای بیان کمی S دو گروه مدل‌های خرد و کلان وجود دارند. مدل‌های خرد به‌دلیل فرضیات غیرواقعی و غیرعملی بودن تعیین کمیت‌های مورد نیاز، تاکنون این مدل‌ها به بوته آزمایش گذاشته نشده‌اند. در مدل‌های کلان مقدار برداشت آب توسط گیاه با مقدار تعرق واقعی از حجم محدوده رشد ریشه برابر فرض می‌شود. بنابراین، هنگامی که هیچ‌گونه محدودیت آبی یا تنش دیگری در خاک وجود نداشته باشد، مقدار آب جذب شده توسط گیاه معادل تعرق پتانسیل بوده و معادله کلی آن به‌صورت زیر است:

$$S=S_{max}=\frac{T_p}{Z_r} \qquad [2]$$

که در آن، Z_r عمق توسعه ریشه و T_p تعرق پتانسیل است. حال اگر خاک نتواند به هر دلیلی نیاز آبی گیاه را بر ای حداکثر تعرق فراهم آورد، به اندازه α که تابع کاهش نامیده می‌شود، از تعرق کاسته می‌شود(۵):

$$S=\alpha S_{max}=\alpha\frac{T_p}{Z_r} \qquad [3]$$

بررسی منابع نشان می‌دهد روابط متعددی توسط محققین از جمله ماس- هافمن (۱۶)، دیرکسن و همکاران (۱۲)، ون‌گنوختن (۲۱) و همایی (۱۳) در شرایطی که خاک تحت تنش شوری و خشکی می‌باشد برای تابع کاهش ارائه شده است. آنها α را تابعی از پتانسیل ماتریک و پتانسیل اسمزی

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

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]

معرفی کردند. در این پژوهش وجود فلز سنگین در خاک در غلظت‌های بالا را به‌عنوان یک تنش درنظر گرفته و با الگو گرفتن از مدل‌های کمی پیشنهادی برای تابع کاهش، مدل‌هایی کلان برای کمی کردن جذب آب در سطوح مختلف غلظت آلاینده در خاک به‌صورت زیر بیان گردید:

$$\alpha(C_s)=\frac{T}{T_m}=1-a\left(C_s-C_s^*\right) \qquad [4]$$

$$\alpha(C_s)=\frac{T}{T_m}=\frac{1}{1+\left(\frac{C_S^*-C_S}{C_S^*-C_S^{50}}\right)^p} \qquad [5]$$

که در آن، T تعرق گیاه در سطوح مختلف آلودگی، T_m بیشینه تعرق در بازه‌های زمانی، C_S غلظت فلز کل در خاک ($mg\ kg^{-1}$)، C_S^* غلظت کل فلز خاک در آستانه کاهش جذب آب به‌وسیله گیاه ($mg\ kg^{-1}$)، a شیب خط کاهش C_s^{50} غلظتی از فلز در خاک که جذب آب به‌وسیله گیاه را ۵۰ درصد کاهش داده است و P ضریبی تجربی می‌باشد. رابطه ۴ برگرفته از مدل خطی ماس- هافمن(۱۶) و رابطه ۵ برگرفته از مدل غیرخطی دیرکسن و همکاران(۱۲) می‌باشد. خداوردی‌لو و همایی با بهره‌گیری از حاصل ضرب غلظت آلاینده در جریان ورودی سامانه ریشه گیاه در نرخ تعرق ، مدلی برای محاسبه نرخ پالایش آلاینده از خاک ارائه کردند(۱):

$$r_r=\phi TC \qquad [6]$$

که در آن: r_r نرخ پالایش سبز فلز از خاک ($m\ mg^{-2}\ day^{-1}$)، T نرخ تعرق گیاه($lit\ m^{-2}day^{-1}$)، C غلظت فلز در فاز محلول ($mg\ lit^{-1}$) و φ فاکتور غلظت آلاینده در جریان تعرق وابسته به نوع آلاینده، خاک و گیاه می‌باشد.

عموماً، غلظت محلول فلزات سنگین خاک بسیار اندک بوده و اندازه‌گیری آن با روش‌های متداول به‌سادگی امکان‌پذیر نیست و یا خطاهای زیادی دارد، از اینرو می‌توان غلظت محلول فلزات سنگین در خاک را به‌عنوان بخشی از غلظت کل آنها در خاک در نظر گرفت:

$$C=\varepsilon\frac{\rho_b C_S}{\theta_v} \qquad [7]$$

که در آن، C_S غلظت کل فلز در خاک ($mg\ kg^{-1}$)، ρ_b چگالی ظاهری خاک ($kg\ m^{-3}$)، θ_v رطوبت حجمی خاک ($m^3\ m^{-3}$)، ε ضریب انحلال‌پذیری فلز در خاک می‌باشد.

با ترکیب روابط ۶ و ۷ و قرار دادن $\lambda=\varepsilon\varphi$ داریم:

$$r_r=\lambda\frac{\rho_b TC_S}{\theta_v} \qquad [8]$$

که در آن λ فاکتوری ترکیبی است که به نوع آلاینده، خاک و گیاه وابسته است. چنانچه مناسب‌ترین تابع جذب نسبی آب گزینش شود، می‌توان با جایگزینی این تابع در رابطه ۸، نرخ پالایش سبز آلاینده را از خاک برآورد کرد.

ایده استفاده از مدل‌های تعرق نسبی برای برآورد نرخ پالایش آلاینده از خاک توسط خداوردی‌لو و همایی مطرح شد. آنها در پژوهشی اعتبار چنین مدل‌هایی را برای برآورد نرخ پالایش کادمیوم و سرب توسط دو گیاه شاهی و اسفناج مورد ارزیابی قرار دادند و بر پایه نتایج تحقیقاتشان دریافتند که امکان دستیابی به برآوردهایی نسبتاً دقیق از نرخ پالایش آلاینده با استفاده از این مدل‌ها وجود دارد(۱). در پژوهشی دیگر، داوری و همکاران استفاده از توابع کاهش تعرق نسبی را جهت مدل‌سازی پالایش آلاینده‌های نیکل و کادمیوم توسط دو گیاه کلم زینتی و شاهی به بوته آزمایش گذاشتند. نتایج آنها نشان داد که با به‌کارگیری این توابع در مدل، نرخ گیاه‌پالایی آلاینده نیکل توسط کلم زینتی و نرخ گیاه‌پالایی آلاینده‌های نیکل و کادمیوم توسط شاهی با دقت بالایی برآورد می‌شود(۳). این پژوهش با هدف تعیین نرخ پالایش سبز نیکل به‌وسیله گیاه ریحان (*Ocimum tenuiflorum* L.) با استفاده از پارامترهایی کلان همچون تعرق نسبی و غلظت آلاینده‌ها در خاک و گیاه اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

برای ارزیابی مدل، پژوهشی در گلخانه دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. برای انجام آن از خاک موجود در مزرعه دانشگاه استفاده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است. در این پژوهش، غلظت مجاز

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

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]

نیکل ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک درنظر گرفته شد(۷). بنابراین، با توجه به حدود غلظت مجاز نیکل، غلظت‌های ۵۰، ۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم انتخاب شدند. برای آلوده کردن خاک، ابتدا مقدار لازم از نمک حاوی نیکل (نیترات نیکل) برای آلوده کردن جرم مشخصی از خاک محاسبه شد. سپس جرم محاسبه شده نمک همراه با مقداری آب مقطر در داخل سمپاش ریخته و به‌وسیله یک مخلوط‌کن دستی به خاک اضافه شد. پس از آن خاک‌های آلوده طی دوره انکوباسیون در رطوبتی نزدیک به ظرفیت زراعی آبیاری و به‌مدت یک ماه رها شدند تا ضمن تکامل یافتن فعل و انفعالات آلاینده در خاک، شرایط آلودگی طبیعی‌تر شود. سپس خاک آلوده شده با نیکل با تراکمی یکسان در سه تکرار برای هر غلظت در گلدان‌های پنج کیلوگرمی با ارتفاع ۲۰ سانتی متر ریخته شد. پس از پر کردن گلدان‌ها بذر ریحان با تعدادی بیش از آنچه مورد نیاز بود در آنها کشت گردید. پس از جوانه زدن بذرها، بوته‌ها به تعداد چهار بوته در هر گلدان تقلیل یافت. برای جلوگیری از هر گونه تنش تغذیه‌ای مقدار کافی از عناصر غذایی ضروری گیاه (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) به‌صورت کودهای شیمیایی در مراحل رشد به گلدان‌ها اضافه گردید. جهت آبیاری، گلدان‌ها با فواصل زمانی کوتاه (۴۸ ساعت) توزین و تا رسیدن به ظرفیت زراعی آبیاری شدندتا مشکلی از لحاظ تنش آبی به وجود نیاید. وزن هر گلدان در رطوبت ظرفیت مزرعه یادداشت شد تا در مراحل بعدی آبیاری از آن استفاده شود. اختلاف وزن هر گلدان با وزن گلدان در رطوبت ظرفیت مزرعه به‌عنوان تعرق گیاه درنظر گرفته شد. به‌همین منظور برای کاهش تبخیر از سطح خاک گلدان‌ها، رویه خاک گلدان‌ها با خاک و کاغذ آلومینیوم پوشانده شد. با توجه به دوره رشد (۶۴ روز)، گیاهان در چهار نوبت برداشت شدند. نمونه‌های گیاهی پس از برداشت با آب مقطر شسته و در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک گردیدند. نمونه‌های خشک شده با استفاده از آسیاب برقی با محفظه استیل آسیاب شدند. غلظت نیکل در خاک و گیاه با روش اکسیداسیون تر(۸، ۹) و غلظت نیکل محلول در خاک به نسبت ۱:۲ با آب مقطرعصاره‌گیری(۱) و پس از به هم‌زدن نمونه‌ها، غلظت آنها با دستگاه جذب اتمی پرکین المر۳۰۳۰ اندازه‌گیری شد.

برای به دست آوردن جذب نسبی آب به‌وسیله گیاه، تعرق گیاه ریحان در سطوح مختلف آلودگی بر بیشینه تعرق آن در همان بازه زمانی تقسیم شد. سپس نتایج به‌دست آمده در آزمایش‌ها با نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی مقایسه گردید. جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. هم‌چنین برای ارزیابی روابط، محاسبه آماره‌های خطای ماکزیمم (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (CD)، کارایی مدل (EF)و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) برای هر کدام از مدل‌ها انجام شد(۱).

نتایج و بحث

شکل‌های۱ و ۲ روند تغییرات جذب نسبی آب به‌وسیله ریحان در پایان فصل رشد را نشان می‌دهند. شکل‌ها نشان می‌دهند میزان تعرق گیاه در حضور آلاینده در خاک کاهش یافته است. لذا وجود فلزات سنگین همانند دیگر تنش‌های غیرزیستی مثل تنش‌های خشکی و شوری، باعث کاهش جذب آب به‌وسیله گیاه می‌شود. اما به‌دلیل پایین بودن غلظت‌های اعمال شده تغییرات چشمگیر نبوده است. مقدار ضرایب روابط با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا به‌دست آمد. سپس با قرار دادن مقدار ضرایب در روابط ۴ و ۵ تعرق نسبی هر گیاه در سطوح مختلف آلودگی نیکل خاک محاسبه شد.

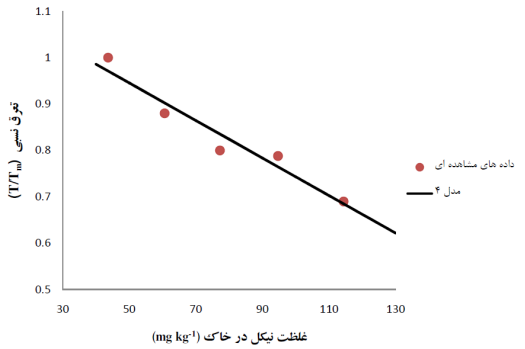
آماره‌های ریاضی برای مقایسه دو مدل در جدول ۲ آمده است. مقادیر بالای R^2 به‌دست آمده برای هر دو رابطه، نشان دهنده برازش خوب مدل‌ها با مقادیر مشاهده‌ای تعرق نسبی گیاه در سطوح مختلف آلودگی نیکل در خاک می‌باشد. مقادیر بسیار پایین ME نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل‌ها تفاوت کمی با هم دارند. مقادیر پایین RMSE گویای انحراف‌های کم مقادیر تعرق نسبی به‌دست

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

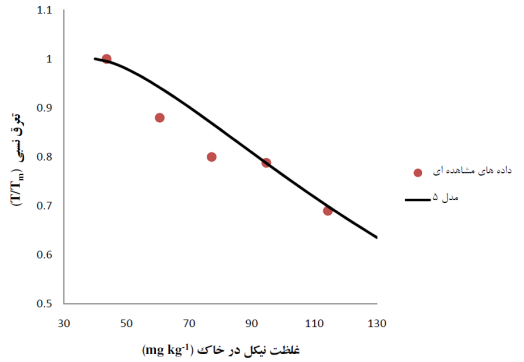
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]

جدول ۱. برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده در پژوهش

٪Sand	Silt٪	Clay ٪	کلاس بافت	ρ_b (gcm^{-3})	θ_{FC} ($cm^{-3}cm^{3}$)	OC ٪	$CaCo_3$ ٪	EC_e (dsm^{-1})	CEC ($Cmol\ kg^{-1}$)
۶۴	۱۶	۲۰	لوم‌رسی‌شنی	۱/۴	۰/۲۲	۰/۲۸۶	۳۷/۵	۱/۹	۲۷/۶



شکل ۱. تعرق نسبی ریحان در سطوح مختلف آلودگی نیکل خاک در پایان دوره رشد گیاه و برازش رابطه ۴ بر مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۲. تعرق نسبی ریحان در سطوح مختلف آلودگی نیکل خاک در پایان دوره رشد گیاه و برازش رابطه ۵ بر مقادیر اندازه‌گیری شده

جدول ۲. نتایج ارزیابی اعتبار روابط در برآورد تعرق نسبی ریحان در سطوح مختلف آلودگی نیکل در خاک

	R^2	ME	RMSE (٪)	CD	EF	CRM
رابطه ۴	۰/۹۴	۰/۰۳۵	۱/۹۴۶	۱/۰۶۱	۰/۹۴۱	$۱/۱۶\times۱۰^{-۶}$
رابطه ۵	۰/۸۳۹	۰/۰۶۸	۳/۲۲۰	۰/۸۹۶	۰/۸۳۹	−۰/۰۳۲

جدول ۳. مقدار ضرایب موجود در روابط برای برآورد تعرق نسبی

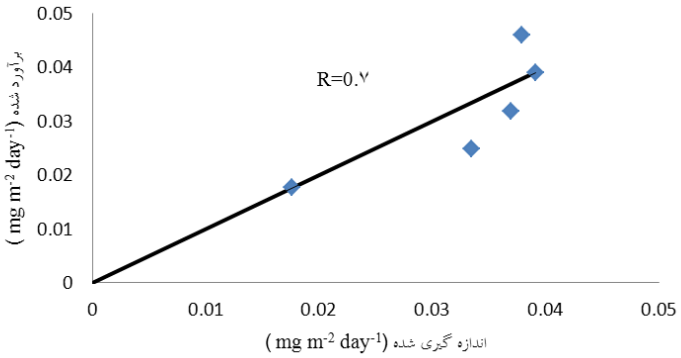
رابطه	a	C_S^*	C_S^{50}	P
۱۴-۳	۰/۰۰۴	۳۶/۴۶	—	—
۱۵-۳	—	۴۰	۱۷۰	۱/۵۱

آمده از مدل با مقادیر مشاهده‌ای دارد. هم‌چنین مقادیر مثبت و منفی CRM برای هر دو مدل به‌ترتیب گویای تمایل مدل‌ها به تخمین کمتر و بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. لذا در حالت کلی نتایج جدول نشان می‌دهد که در مورد آلودگی نیکل در خاک، تغییرات تعرق نسبی ریحان را می‌توان با هر دو مدل تعیین کرد و کارایی رابطه ۴ تنها اندکی بهتر از رابطه ۵ است. جدول ۳ مقدار ضرایب موجود در روابط۴ و ۵ را نشان می‌دهد.

داوری و همکاران (۱۳۸۸) نشان دادند که در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیوم در خاک، برآوردهای مدل کاهش خطی (رابطه ۴) بر داده‌های اندازه‌گیری شده تعرق نسبی

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

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]



شکل۳. مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ پالایش سبز نیکل توسط ریحان در برابر مقادیر برآورد شده آن با استفاده از رابطه ۹ (خط ممتد نشان‌دهنده خط ۱:۱ می‌باشد.)

کلم زینتی و شاهی مطابقت چندان بالایی ندارد و برآوردهای مدل‌های کاهش غیرخطی (مدل ون‌گنوختن و دیرکسن) بر داده‌های اندازه‌گیری شده تعرق نسبی هر دو گیاه کلم زینتی و شاهی سازگاری بالا و نسبتاً یکسان دارند(۳). خداوردی‌لو (۱۳۸۷) نشان داد که در سطوح مختلف غلظت سرب و کادمیوم در خاک، مدل غیرخطی برگرفته از رابطه ون‌گنوختن برازش بهتری با داده‌های اندازه‌گیری شده تعرق نسبی شاهی و اسفناج دارد(۲). عدم یکسان بودن نتایج به‌دست آمده با نتایج محققان دیگر را می‌توان به پایین بودن دامنه غلظت‌های انتخابی مربوط دانست که مانع از به تصویر کشیدن واکنش گیاه در غلظت‌های بالاتر بوده و عکس‌العمل گیاه را نسبت به آلاینده کاملاً نشان نداده است و فقط محدوده کمی از غلظت‌ها را در برگرفته است. به‌همین دلیل رابطه خطی برازش بهتری نسبت به‌رابطه غیرخطی داشته است، در صورتی که به‌نظر می‌رسد کاهش تعرق نسبی گیاه از یک رابطه غیر خطی پیروی کند(۱).

با جایگذاری مقدار T از مدل ۴ در رابطه ۸ معادله زیر برای برآورد نرخ پالایش فلز از خاک به دست آمد:

$$r_{\cdot} = \lambda \frac{\rho_b C_S}{\theta_v} . T_m \left[1 - a\left(C_S - C_S^* \right) \right] \qquad [9]$$

ضریب λ در رابطه ۹ با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا به‌دست آمد. مقدار عددی λ در مورد آلودگی نیکل خاک $1/99\times10^{-5}$ به‌دست آمد. شکل ۳ مقادیر برآورد شده نرخ پالایش نیکل توسط گیاه ریحان را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آن نشان می‌دهد. شکل ۳ نشان می‌دهد که رابطه ۹ برازش نسبتاً خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ پالایش سبز نیکل از خاک دارد.

نتیجه حاصل از این پژوهش با نتیجه پژوهش داوری و همکاران سازگاری نسبتاً بالایی دارد، به‌گونه‌ای که این محققین در پژوهش خود گزارش کردند که نرخ پالایش سبز نیکل توسط شاهی ($R \geq ۰/۹$) و کلم زینتی ($R= ۰/۸۸$) هم‌بستگی معنی‌داری با مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ پالایش دارد(۳). خداوردیلو (۱۳۸۴) در پژوهشی نشان داد که برآورد نرخ پالایش سبز کادمیوم و سرب توسط شاهی با استفاده از توابع تعرق نسبی هم بستگی معنی‌داری با مقادیر اندازه‌گیری شده ندارد(۳). لیکن استفاده از این رابطه برآوردهای قابل قبولی از نرخ پالایش سبز کادمیوم و سرب توسط گیاه اسفناج ($R \geq ۰/۹$) به‌دست می‌دهد(۱). بنابراین نتایج نشان می‌دهد که نوع گیاه و نوع آلاینده در میزان نرخ پالایش تأثیر داشته و میزان هم‌بستگی مدل تاحدود زیادی تابع این دو عامل می‌باشد. اما پایین بودن مقدار ضریب هم‌بستگی به‌دست آمده در این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط این محققین را می‌توان به‌عدم دقت لازم در تخمین مقدار غلظت نیکل در فاز محلول خاک مربوط دانست. به‌عبارتی دیگر، کوچک بودن دامنه غلظت‌ها و هم‌چنین پایین بودن غلظت‌های انتخابی در این پژوهش ضمن اینکه مانع از به تصویر کشیدن واضح‌تر واکنش خاک وگیاه به‌وجود

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

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]

آلاینده در خاک بوده، باعث پایین بودن غلظت‌های موجود در فاز محلول خاک می‌باشد. پایین بودن غلظت نیکل در فاز محلول خاک باعث شد تا غلظت محلول به‌عنوان بخشی از غلظت کل در خاک نظر گرفته شود و مقدار آن با استفاده از یک رابطه خطی پیش‌بینی شود که این امر باعث بروز خطا در برآورد مقدار نیکل در فاز محلول خاک و پایین بودن ضریب هم‌بستگی شود. لذا به‌نظر می‌رسد در صورت دسترسی به‌اندازه‌گیری‌های مناسب از غلظت آلاینده در فاز محلول خاک، مدل پیشنهادی از ترکیب توابع تعرق نسبی گیاه و غلظت آلاینده در فاز محلول خاک برآوردی دقیق از نرخ پالایش سبز این آلاینده به ما ارائه دهد.

منابع مورد استفاده

۱. خداوردی‌لو، ح. ۱۳۸۴. مدل‌سازی خاک‌های آلوده به کادمیوم و سرب. رساله دوره دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

۲. خداوردی‌لو، ح. و م. همایی. ۱۳۸۷. مدل‌سازی پالایش سبز کادمیوم و سرب از خاک‌های آلوده با استفاده از توابع کاهش تعرق گیاه. مجله آبیاری و زهکشی ایران ۲(۱): ۱۶-۷.

۳. داوری، م.، م. همایی و ح. خداوردی‌لو. ۱۳۸۸. مدل‌سازی گیاه پالایی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نیکل و کادمیم با استفاده از توابع ماکروسکپیک کاهش تعرق. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (۵۲): ۸۴- ۷۵.

۴. عرفان منش، م. و م. افیونی. ۱۳۸۱. *آلودگی محیط زیست آب، خاک و هوا*. انتشارات ارکان.

۵. همایی، م. ۱۳۸۱. *واکنش گیاهان به شوری*. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵۸.

6. Abedi-Koupai, J., B. Mostafazadeh, M. Afyuni and M. R. Bagheri. 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. J. Plant, Soil and Environ. 52: 335-344.
7. Adriano, D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Springer-Verlag, New York.
8. Benton Jones, J. R. and V. W. Case. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue sample. PP: 389-429. *In*: Westerman, R. L. (Ed.), Soil Testing and Plant Analysis. SSSA, No.3, Madison, WI.
9. Carter, M. R. 1993. Soil Sampling and Method of Analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Pub.
10. Classen, M., K. M. Syring and A. Jungk. 1986. Verification of a mathematical model by simulating potassium uptake from soil. Plant Soil 95:209-220.
11. Cunningham, S. D. and D. W. Ow. 1996. Promises and prospects of phytoremediation. Plant Physiol. 110:715-719.
12. Dirksen, C., J. B. Kool, P. Koorevaar and M. Th. van Genuchten. 1993. HYSWASOR- Simulation Model for Hysteretic Water and Solute Transport in the Root Zone. PP: 99-122. *In*: D. Russo and G. Dagan (Eds.), Water Flow and Solute Transport in Soils. Springer Verlag.
13. Homaee, M., C. Dirksen and R. A. Feddes. 2002. Simulation of root water uptake. Non-uniform transient salinity stress. Agric. Water Manag 57: 89-109.
14. Jorgensen, S. E. 1988. Modeling the contamination of agricultural products by lead and cadmium. PP: 343-350. *In*: A. Marani (Ed.), Advances in Environmental Modelling.
15. Lasat, M. M. 2002. Phytoextraction of toxic metals: A review of biological mechanisms. J. Environ. Qual. 31: 109-120.
16. Maas, E. V. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-Current assessment. J. Irrig. Drainage Div., ASCE. 103:115-134.
17. Mathur, S. 2004. Modelling phytoremediation of soils: practice periodical of hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management. 8: 286-297
18. Mathur, S. and B. K. Yadav. 2009. Phytoextraction modeling of heavy metal (lead) contaminated site using maize (Zea Mays). practice periodical of pazardous, Toxic and Radioactive Waste Management. 4: 229-238
19. Mullins, G. L., L. E. Sommers and S. A. Barber. 1986. Modelling the plant uptake of cadmium and zinc from soils treated with sewage sludges. Soil Sci. Soc. Am. J. 50:1245-1250.
20. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics. 1: 318-333.

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

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]

21. Van Genuchten, M. Th. and G. j. Hoffman. 1984. Analysis of Crop Salt Tolerance Data. PP: 258-271. *In*: Shainberg, I., and Shalhevet, J. (Eds.), Soil Salinity under Irrigation Process and Management. Ecol. Stud. 51. Springer-Verlag, New York.
22. Verma, P., k. V. George, H. V. Singh and R. N. Singh. 2007. Modeling cadmium accumulation in radish, carrot, spinach and cabbage. Appl. Math. Modeling. 31:1652-1661.
23. Verma, P., K. V. George, H. V. Singh, S. K. Singh. A. Juwarkar and R. N. Singh. 2006. Modelling rhizofiltration: Heavy-metal uptake by plant roots. Environ. Model. Assess. 11: 387-394

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

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.2.9]