

## مدل‌سازی گیاه پالایی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نیکل و کادمیم با استفاده از توابع ماکروسکوپیک کاهش تعرق

مسعود داوری<sup>۱</sup>، مهدی همایی<sup>۱\*</sup> و حبیب خداوردی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۲/۱۲)

### چکیده

گیاه پالایی از روش‌های آلودگی‌زدایی نوین، درجا و مستقیم است که طی آن از گیاهان برای آلودگی‌زدایی خاک‌ها استفاده می‌شود. این روش در مقایسه با دیگر روش‌های پالایش، روشی پایدار، طبیعی، کم هزینه و قابل کاربرد در سطوح وسیع است. مدل‌سازی گیاه پالایی می‌تواند اطلاعاتی کمی از این فناوری و فرایندهای حاکم بر آن را در اختیار مدیران قرار دهد. بنابراین هدف از این پژوهش، مدل‌سازی گیاه پالایی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نیکل و کادمیم بود. بدین منظور، با استفاده از توابع کاهش تعرق نسبی و غلظت نسبی نیکل و کادمیم در گیاه به عنوان تابعی از غلظت این آلاینده‌ها در خاک، مدلی برای تعیین نرخ گیاه پالایی این آلاینده‌ها از خاک ارائه شد. به منظور آزمون مدل‌های پیشنهادی، خاک با سطوح مختلفی از آلاینده‌های نیکل و کادمیم آلوده شد. سپس با پر کردن گلدان‌ها با خاک‌های آلوده، بذر شاهی (*Lepidum sativum*) و کلم زیتنی (*Brassica oleracea var. Viridis*) در آنها کشت شد. گیاهان به ترتیب در سه و چهار بازه زمانی برداشت شدند. در هر مرحله از ابتدا تا انتهای دوره رشد، گیاهان تا رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی با آب غیر آلوده آبیاری شدند. در هر مرحله از برداشت، مقادیر تعرق نسبی و غلظت نیکل و کادمیم در نمونه‌های خاک و گیاه اندازه‌گیری شد. سپس، کارایی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی آزمون شد. نتایج حاصل از مقایسه آماره‌های کارایی مدل، ریشه میانگین مربعات خطا، خطای بیشینه، ضریب تبیین و ضریب جرم باقی‌مانده نشان داد مدل غیرخطی و بدون آستانه کاهش در برآورد تعرق نسبی کلم زیتنی و شاهی در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم در خاک کارایی بالایی دارد. هم‌چنین، مدل حاصل از ترکیب تابع غیرخطی بدون آستانه و غلظت نسبی نیکل و کادمیم گیاه، نتایجی کارآمد در برآورد نرخ گیاه پالایی نیکل و کادمیم توسط شاهی ( $R^2 > 0/83$ ) و نیکل توسط کلم زیتنی ( $R^2 = 0/78$ ) ارائه کرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، گیاه پالایی، نیکل، کادمیم، مدل‌سازی

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اورمی

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mhomaee@modares.ac.ir

## مقدمه

خاک، آب و نیوار و سوخت و ساز و مکانیسم‌های جذب و اندوزش آنها در ریشه، شاخساره و برگ به صورتی کاملاً پیچیده لحاظ شده است (۵). صرف نظر از پیچیده بودن این مدل‌ها، لزوم اندازه‌گیری‌های دشوار و پرهزینه پارامترها و عوامل لحاظ شده در این مدل‌ها، از کارآمدی کاربرد آنها در سطح مزرعه و حتی در مقیاس آزمایشگاهی می‌کاهد. از این رو، بیشتر مدل‌های ریاضی و مکانیسمی که در این زمینه انتشار یافته‌اند برای کمی نمودن جذب و انتقال املاح و عناصر غذایی است، و تعداد انگشت شماری هم که برای گیاه پالایی آلاینده‌ها بنا شده‌اند عملاً در شرایط واقعی محیطی ناکام مانده‌اند (۱).

بنابراین، تاکنون ایجاد مدلی آسان، کارا و دوست‌دار کاربر که به جای لحاظ نمودن فرآیندها و عوامل پیچیده در آن از پارامترهایی کلان، سهل الوصول و قابل اندازه‌گیری برای مدل‌سازی گیاه پالایی بهره بگیرد بی‌نتیجه مانده است. به همین دلیل، در این پژوهش تلاش شد با اندازه‌گیری پارامترهایی کلان همچون تعرق نسبی و غلظت آلاینده‌ها در خاک و گیاه، گیاه پالایی آلاینده‌های نیکل و کادمیم از خاک با استفاده از شاهی (*Lepidum sativum*) و کلم زیتنی (*Brassica olerace var. Viridis*) کمی شود.

## اشتقاق مدل‌های جذب آب در گیاهان

جذب آب در گیاهان را می‌توان با استفاده از معادله کلی جریان به صورت کمی بیان کرد (۱۵):

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

که در آن،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک ( $L^3 L^{-3}$ )،  $t$  زمان ( $T$ )،  $z$  راستای جریان ( $L$ )،  $K$  ضریب آبگذری غیر اشباع خاک ( $L T^{-1}$ )،  $h$  بار فشاری آب در خاک ( $L$ ) و  $S$  تابع تولید/ مصرف (Sink/ Source term) است که بیانگر مقدار آب جذب شده به وسیله گیاه در واحد حجم خاک و زمان ( $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ) است. مدل‌هایی که برای کمی کردن  $S$  ارائه شده‌اند را می‌توان به دو گروه خرد و کلان تقسیم نمود. دستیابی به پارامترهای لحاظ شده در مدل‌های خرد به دلیل فرضیات مبنایی غیر واقعی تاکنون بی‌نتیجه

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مشکلات اساسی زیست بوم است. عمده‌ترین منابع رهاسازی فلزات سنگین به خاک مربوط به فعالیت‌های صنعتی است که شامل معدن‌کاوی، ذوب فلزات، صنایع آبکاری، فلزکاری، مصرف سوخت و تولید انرژی، تخلیه فاضلاب و انهدام زباله، کاربرد آفت‌کش‌ها، کودها و لجن فاضلاب مصرفی در بخش کشاورزی می‌باشد (۴، ۱۲ و ۱۷). تاکنون شماری از فناوری‌های فیزیکی و شیمیایی همچون تثبیت خاک، خاک‌برداری و خاک‌ریزی، دفن خاک، اسیدشویی و شستشوی خاک برای پالایش این مناطق آلوده به کار می‌رفته‌اند (۱۴). لیکن، اجرای بیشتر این فناوری‌ها پرهزینه، طاقت‌فرسا و خسارت‌زا است. بنابراین، استفاده از روش‌هایی نوین، کم‌هزینه و کارا در پالایش مکان‌های آلوده ضروری می‌باشد (۶). گیاه پالایی (Phytoremediation) از روش‌های آلودگی‌زدایی نوین، درجا و مستقیم است که طی آن از گیاهان برای زدودن آلودگی‌ها از خاک، رسوبات، آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و نیوار استفاده می‌شود. گیاه پالایی روشی پایدار، طبیعی، کم‌هزینه، آسان، دوست‌دار زیست بوم و قابل کاربرد در سطوح وسیع است. گیاه با ترسیب، تثبیت و تجزیه ترکیبات آلاینده در ریزوسفر، جذب انتخابی فلزات و تجمع آنها در شاخساره‌های خویش و یا تصعید آلاینده‌ها به اتمسفر، موجب کاهش مقدار و یا سمیت آلاینده‌ها می‌شود (۸ و ۱۶).

مدل‌های گیاه پالایی آلاینده‌ها برای شناخت فرآیندهای بنیادین حاکم بر این فناوری و بهبود کارایی آن برای مدیریت خاک‌های آلوده بسیار بلااثرش می‌باشند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان مقدار جذب آلاینده‌ها را به وسیله گیاه برآورد و به تبع آن زمان لازم برای پالایش آنها را از مکان‌های آلوده کمی نمود. هم‌چنین، مدل‌سازی جذب و اندوزش آلاینده‌ها قبل از اجرا کردن آن در سطح مزرعه می‌تواند اطلاعاتی ارزشمند راجع به این فرایند در اختیار مدیران قرار دهد. بنابراین تاکنون بیشتر مدل‌هایی که در زمینه گیاه پالایی انتشار یافته‌اند نسخه‌ای بسط یافته از مدل‌های جذب املاح و عناصر غذایی توسط گیاهان است. در این مدل‌ها برهم‌کش بین آلاینده‌ها، خاک و ریشه، دینامیک جذب آلاینده‌ها از

چنانچه تابع کاهش را غیرخطی و از نوع سیگموئیدی در نظر بگیریم می توان تابع غیرخطی زیر را پیشنهاد نمود:

$$\alpha(C_{S_{Ni, Cd}}) = \frac{T_a}{T_m} = \frac{1}{1 + \left( \frac{C_{S_{Ni, Cd}}}{C_{S_{Ni, Cd}(\delta^0)}} \right)^p} \quad [5]$$

که در آن،  $(C_{S_{Ni, Cd}(\delta^0)})$  غلظتی از نیکل و کادمیم ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) است که در آن جذب آب به اندازه  $50\%$  درصد کاهش می یابد.  $p$  نیز ضریبی تجربی است که به خاک، گیاه و اقلیم وابسته است.

اگر فرض شود که جذب نسبی آب به وسیله گیاه تا رسیدن به غلظتی معین  $(C_{S_{Ni, Cd}}^*)$  کاهش نمی یابد، آنگاه مدل زیر را می توان برای تابع کاهش  $\alpha$  به عنوان تابعی از افزایش غلظت آلاینده های نیکل و کادمیم در خاک پیشنهاد کرد:

$$\alpha(C_{S_{Ni, Cd}}) = \frac{T_a}{T_m} = \frac{1}{1 + \left( \frac{C_{S_{Ni, Cd}}^* - C_{S_{Ni, Cd}}}{C_{S_{Ni, Cd}}^* - C_{S_{Ni, Cd}(\delta^0)}} \right)^p} \quad [6]$$

افزون بر این، می توان مدلی غیرخطی و دو آستانه ای برای واکنش گیاه به غلظت نیکل و کادمیم در خاک ارائه نمود. بدین منظور مقدار  $C_{S_{Ni, Cd}(\delta^0)}$  با  $C_{S_{Ni, Cd}Max}$  جایگزین و معادله ای پیشنهاد کرد که دارای دو آستانه کاهش  $(C_{S_{Ni, Cd}}^*$  و  $\alpha_0)$  باشد.

$$\alpha(C_{S_{Ni, Cd}}) = \frac{T_a}{T_m} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - \alpha_0}{\alpha_0} \right) \left( \frac{C_{S_{Ni, Cd}}^* - C_{S_{Ni, Cd}}}{C_{S_{Ni, Cd}}^* - C_{S_{Ni, Cd}Max}} \right)^p} \quad [7]$$

که در آن،  $C_{S_{Ni, Cd}Max}$  غلظتی از نیکل و کادمیم است که در بیشتر از آن گیاه همچنان زنده بوده لیکن در سطحی بسیار اندک به فعالیت خود ادامه می دهد.  $p$  نیز ضریبی تجربی است که به گیاه، خاک و اقلیم وابسته بوده و می توان آن را به صورت زیر تعریف کرد:

$$p = \frac{C_{S_{Ni, Cd}Max}}{C_{S_{Ni, Cd}Max} - C_{S_{Ni, Cd}}^*} \quad [8]$$

خداوردی لو و همایی (۱) با بهره گیری از حاصل ضرب غلظت آلاینده در جریان ورودی سامانه ریشه گیاه در نرخ تعرق، مدلی برای محاسبه نرخ پالایش آلاینده از خاک ارائه کردند:

مانده است. لیکن تعیین پارامترهای مدل های کلان به سادگی امکان پذیر است. در این مدل ها، مقدار برداشت آب به وسیله گیاه با مقدار تعرق واقعی (Actual Transpiration) از حجم محدوده رشد ریشه برابر فرض می شود (۱۰ و ۱۱). لذا در نبود محدودیت آبی یا هرگونه تنش دیگری در خاک، مقدار جذب آب به وسیله گیاه ( $S = S_{max}$ ) معادل تعرق پتانسیل بوده و معادله کلی آن به شکل زیر است:

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

که در آن،  $Z_r$  ژرفای گسترش ریشه ( $L$ ) و  $T_p$  تعرق پتانسیل است. اگر خاک به هر دلیلی نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق فراهم کند، به اندازه  $\alpha$  که به آن تابع کاهش (Reduction function) گویند، از تعرق کاسته می شود (۷):

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

در این پژوهش، اثر آلاینده موجود در خاک بر گیاه به عنوان یک تنش پنداشته شد و بدین ترتیب، جذب نسبی آب به وسیله گیاه به عنوان تابعی از غلظت آلاینده در خاک بیان گردید. بنابراین با در نظر گرفتن توابع کاهش ( $\alpha$ ) در شرایط وجود آلودگی، مدل هایی کلان برای کمی کردن جذب آب در سطوح مختلف غلظت آلاینده ها در خاک بیان گردید.

بدین ترتیب می توان مدلی خطی و دو تکه ای مانند معادله ماس و هافمن به صورت زیر نوشت (۱۳):

$$\alpha(C_{S_{Ni, Cd}}) = \frac{T_a}{T_m} = 1 - a(C_{S_{Ni, Cd}} - C_{S_{Ni, Cd}}^*) \quad [4]$$

که در آن،  $T_a$  تعرق گیاه،  $T_m$  بیشینه تعرق گیاه،  $a$  شیب خط یا مقدار کاهش جذب آب به ازای یک واحد افزایش غلظت نیکل و کادمیم پس از آستانه کاهش،  $C_{S_{Ni, Cd}}$  غلظت نیکل و کادمیم در خاک و  $C_{S_{Ni, Cd}}^*$  آستانه کاهش غلظت نیکل و کادمیم در خاک است. بر مبنای این مدل تا پیش از آستانه کاهش غلظت نیکل و کادمیم در خاک  $(C_{S_{Ni, Cd}}^*)$  هیچ گونه کاهشی در جذب آب پدید نمی آید. لیکن با افزایش مقدار این آلاینده ها جذب آب به طوری خطی کاهش می یابد.

دوره رشد به خاک افزوده شد. دو گیاه کلم زیتتی و شاهی به ترتیب با گذشت شش ماه و هفتاد روز از زمان جوانه‌زنی برداشت شدند. وزن گلدان‌ها با توجه به وزن تر گیاه در هر برداشت برای دور بعدی تصحیح گردید.

اندام‌های هوایی گیاهان پس از برداشت با آب مقطر شسته و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک گردیدند. نمونه‌های خشک شده با استفاده از آسیاب برقی با محفظه استیل آسیاب شدند. سپس نمونه‌های آسیاب شده تا زمان عصاره‌گیری در پاکت کاغذی نگهداری شدند. نیکل و کادمیم گیاه با روش اکسیداسیون تر عصاره‌گیری گردید. مقدار نیکل و کادمیم کل خاک با روش هضم اسیدی ( $HNO_3$ ،  $HCl$  و  $H_2O_2$ ) عصاره‌گیری شد (۹). نیکل و کادمیم محلول خاک با تکان دادن نمونه‌هایی با نسبت ۱:۲ (آب مقطر: خاک) به مدت ۲۴ ساعت در تکان دهنده‌ای با ۳۰۰ دور در دقیقه عصاره‌گیری شد. سپس غلظت این آلاینده‌ها در نمونه‌های گیاه و خاک با دستگاه‌های جذب اتمی مدل (Shimadzu AA-670G) و پرتوسنجی نشری پلاسمايي جفت شده القايي مدل (Varian Vista-PRO) اندازه‌گیری شد.

برای به دست آوردن جذب نسبی آب به وسیله گیاه، مقدار تعرق گیاهان در تیمار شاهد (بدون آلودگی نیکل و کادمیم) برابر با تعرق حداکثر لحاظ شد و تعرق نسبی دو گیاه کلم زیتتی و شاهی در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم خاک محاسبه گردید. سپس نتایج به دست آمده در آزمایش‌ها با نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی مقایسه گردید. مدل‌سازی با بهره‌گیری از نرم افزار CurveExpert نسخه ۱/۳۸ انجام شد. برای ارزیابی کمی اعتبار مدل‌های پیشنهادی گیاه پالایی نیکل و کادمیم از آماره‌های خطای بیشینه (Maximum Error) ME، ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) RMSE، ضریب تعیین (Coefficient of Determination) EF، کارایی مدل (Efficiency) CRM (Coefficient of Residual Mass) استفاده شد.

$$r_0 = T_a \beta C_1 \quad [9]$$

که در آن،  $r_0$  نرخ گیاه پالایی آلاینده از خاک ( $mg\ m^{-2}\ d^{-1}$ )،  $T_a$  نرخ تعرق گیاه ( $L\ m^{-2}\ d^{-1}$ )،  $C_1$  غلظت آلاینده در فاز محلول خاک ( $mg\ L^{-1}$ ) و  $\beta$  فاکتور غلظت آلاینده در جریان تعرق (-) که به نوع آلاینده، خاک و گیاه وابسته است.

چنانچه مناسب‌ترین تابع جذب نسبی آب گزینش شود، می‌توان با جایگزینی این تابع در رابطه ۹، نرخ گیاه پالایی آلاینده را از خاک برآورد کرد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در خاکی با بافت لوم رسی، غیرآلوده به آلاینده‌های نیکل و کادمیم در گلدان‌هایی به ارتفاع ۳۰ و قطر ۲۲ سانتی‌متر اجرا شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش به روش معمول در مؤسسه تحقیقات خاک و آب (۲) و (۳) اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

در این پژوهش، غلظت مجاز نیکل و کادمیم به ترتیب ۵۰ و ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد (۴). بنابراین، با توجه به حدود غلظت مجاز آنها در خاک، غلظت‌ها برای نیکل ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و برای کادمیم ۰، ۳، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک انتخاب شدند. سپس، به وسیله نمک‌های کلرید نیکل و کلرید کادمیم، خاک‌ها آلوده شده و به مدت ده هفته در شرایط رطوبتی بین اشباع تا ظرفیت زراعی رها شد تا بر همکنش آلاینده‌ها و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی‌تر شود. سپس، با پر کردن گلدان‌ها در چهار و پنج تکرار، به ترتیب بذره‌های شاهی و کلم زیتتی در آنها کاشته شد.

با جوانه زدن بذرها، به ترتیب تعداد یک و ده بوته قوی و سالم از گیاه کلم زیتتی و شاهی در هر گلدان نگه داشته شد. هم‌چنین رویه خاک با سنگریزه پوشانده شد تا مقدار تبخیر از سطح خاک گلدان‌ها به حداقل ممکن کاهش یابد. برای پیشگیری از هرگونه تنش رطوبتی، گلدان‌ها هر روز وزن و با آب غیر شور و غیر آلوده تا رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی آبیاری شدند. بر اساس نتایج آزمون خاک، نیاز غذایی گیاه به صورت کودهای شیمیایی در طول

جدول ۱. برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

FC (درصد وزنی)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	گروه بافتی	$\rho_b$ ( $gr.cm^{-3}$ )	OC (%)	TNV (%)	EC ( $dS m^{-1}$ )	pH
۲۴	۴۳	۲۹	۲۸	CL	۱/۵	۰/۱۸	۱۳	۰/۲	۷/۶

## نتایج و بحث

مقایسه تغییرات تعرق نسبی اندازه گیری شده دو گیاه کلم زیتنی و شاهی به عنوان تابعی از غلظت نیکل و کادمیم کل خاک و نتایج حاصل از برازش مدل های پیشنهادی (رابطه های ۴، ۵، ۶ و ۷) در شکل های ۱ و ۲ ارائه شده است.

هم چنین، مقادیر پارامترهای مختلف این مدل ها با روش بهینه سازی حداقل مجموع مربعات خطا برآورد شده که نتایج مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است.

همان گونه که شکل های (۱ و ۲) نشان می دهند در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم در خاک، برآوردهای مدل کاهش خطی پیشنهادی (رابطه ۴) بر داده های اندازه گیری شده تعرق نسبی کلم زیتنی و شاهی مطابقت چندان بالایی ندارد. لیکن، برآوردهای مدل های کاهش غیر خطی پیشنهادی (مدل بدون آستانه کاهش ۵، دارای یک آستانه کاهش ۶ و دارای دو آستانه کاهش ۷) بر داده های اندازه گیری شده تعرق نسبی هر دو گیاه کلم زیتنی و شاهی سازگاری بالا و نسبتاً یکسان دارند. شباهت بین این مدل های غیرخطی به گونه ای است که تمایز کارایی آنها از یکدیگر به صورت ترسیمی تقریباً غیرممکن است. بنابراین، برای ارزیابی اعتبار این مدل های پیشنهادی و گزینش مناسب ترین آنها، از آماره های  $EF$ ،  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CD$  استفاده شد. نتایج مربوط به ارزیابی کمی اعتبار مدل های پیشنهاد شده در برآورد تعرق نسبی کلم زیتنی و شاهی در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم خاک در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج حاصل از جدول ۳ نشان می دهد در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم در خاک، تغییرات تعرق نسبی کلم زیتنی را با مدل غیرخطی و بدون آستانه کاهش (۵) بهتر از دیگر مدل های پیشنهادی می توان تبیین کرد. زیرا افزون بر ضریب کارایی بیشتر،

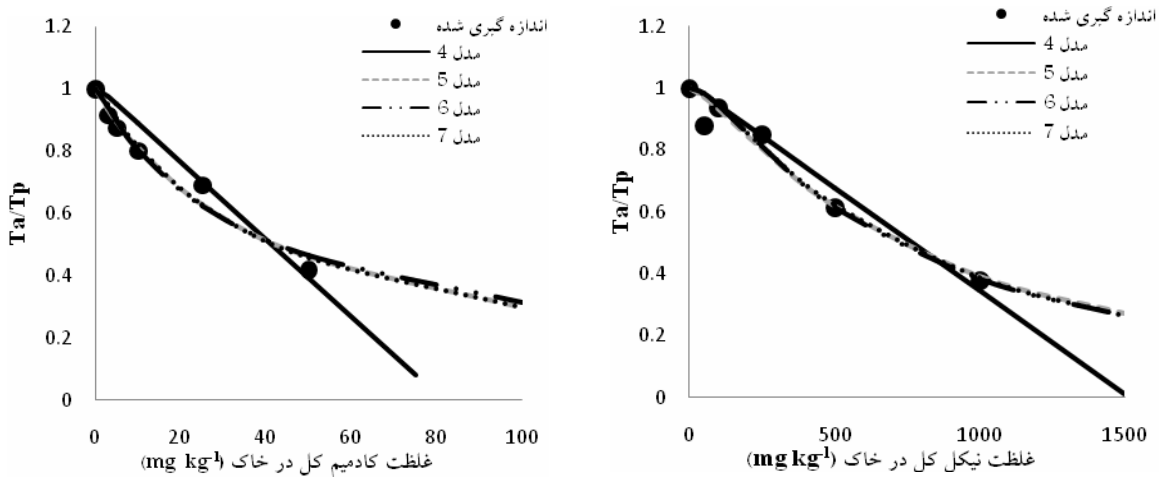
مقادیر  $ME$  و  $RMSE$  این مدل نیز کمتر می باشد. هم چنین، مقدار  $CD$  مدل (۵) به یک نزدیک تر است. از آنجا که مقدار  $CRM$  مدل های پیشنهادی منفی بوده برآورد تعرق نسبی کلم زیتنی به وسیله این مدل ها دارای بیش برآورد است. لیکن، مقدار این بیش برآوردی برای مدل (۵) کمتر از سایر مدل ها می باشد. بنابراین بر پایه نتایج به دست آمده، برای کمی کردن روند تغییرات تعرق نسبی کلم زیتنی در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم در خاک، معادله ۵ بر دیگر مدل ها برتری دارد.

هم چنین، جدول ۳ نشان می دهد که از بین مدل های پیشنهاد شده برای کمی کردن تغییرات تعرق نسبی شاهی، مدل غیرخطی و دو آستانه ای (۷) برآوردهایی دقیق تر ارائه می کند. افزون بر این ارزیابی این آماره ها نشان می دهد، در برآورد تغییرات تعرق نسبی شاهی دیگر مدل های غیرخطی نیز کارآمد می باشند. بنابراین، از آنجایی که هر سه مدل غیرخطی در برآورد تعرق نسبی شاهی کارایی بالا و اساس تجربی یکسانی دارند. لذا در این حالت، کمتر بودن پارامترهای مورد نیاز و آسانی دستیابی به آنها از نکات مهمی است که در انتخاب یک مدل باید مدنظر باشد. در مجموع با توجه به مطالب بیان شده می توان مدل (۵) را برای پیش بینی روند تغییرات تعرق نسبی شاهی در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم در خاک پیشنهاد نمود.

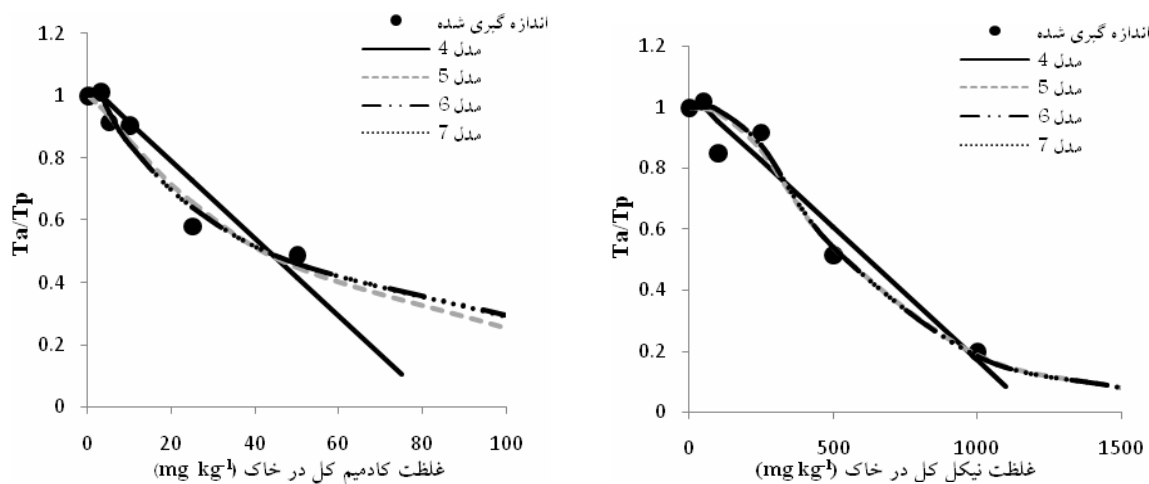
اکنون با جایگزینی  $T_a$  بر مبنای تابع کاهش (۵) در رابطه ۹، معادله زیر برای برآورد نرخ گیاه پالایی آلاینده های نیکل و کادمیم از خاک توسط کلم زیتنی و شاهی به دست می آید:

$$F_0 = \frac{T_m \beta C_l}{1 + \left( \frac{C_{S_{Ni,Cd}}}{C_{S_{Ni,Cd}(50)}} \right)^p} \quad [10]$$

شکل ۳ مقادیر برآورد شده نرخ گیاه پالایی آلاینده های نیکل و کادمیم از خاک توسط کلم زیتنی که با استفاده از رابطه ۱۰ به



شکل ۱. رابطه تعرق نسبی گیاه کلم زینتی (اندازه‌گیری شده و برآورد شده به وسیله مدل‌های پیشنهادی ۴، ۵، ۶ و ۷) با غلظت نیکل و کادمیم کل در خاک



شکل ۲. رابطه تعرق نسبی گیاه شاهی (اندازه‌گیری شده و برآورد شده به وسیله مدل‌های پیشنهادی ۴، ۵، ۶ و ۷) با غلظت نیکل و کادمیم کل در خاک

هم‌بستگی نسبتاً معنی‌داری است ( $R^2=0.780$ ). این امر شاید به این دلیل باشد که غلظت کادمیم در فاز محلول خاک در مقایسه با نیکل به اندازه‌ای پایین است که نمی‌توان به اندازه‌گیری‌های خیلی دقیقی از آن دست یافت. بنابراین، ناکارآمدی مدل پیشنهادی (۱۰) در برآورد نرخ گیاه پالایی آلاینده کادمیم از خاک توسط کلم زینتی چندان دور از انتظار نیست. در شکل ۴ مقادیر برآورد شده نرخ گیاه پالایی آلاینده‌های

دست آمده است را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها نشان می‌دهد.

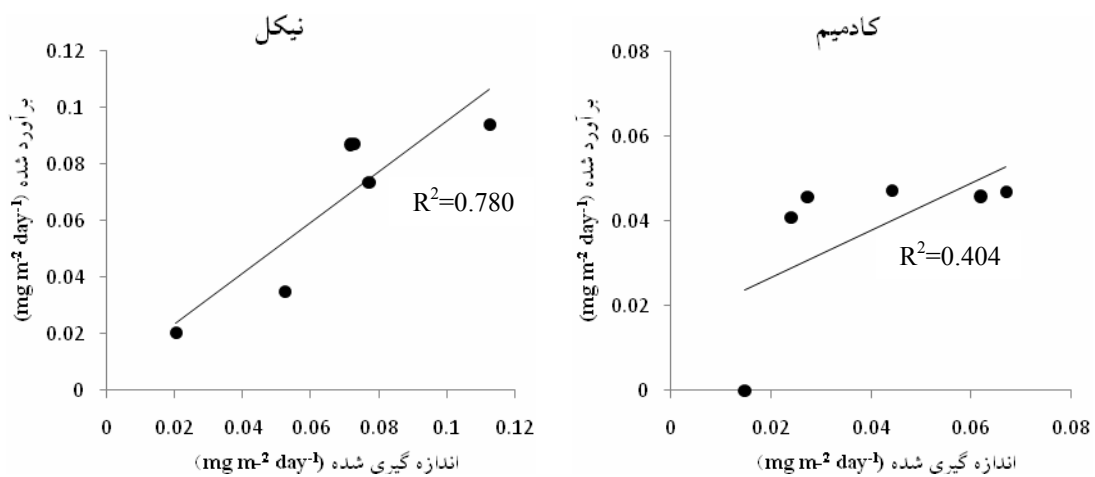
هر چند شکل ۳ و آماره  $R^2$  نشان می‌دهد برآوردهای نرخ گیاه پالایی کادمیم توسط کلم زینتی با استفاده از رابطه ۱۰ با مقادیر اندازه‌گیری شده سازگار نیست. لیکن، در سطوح مختلف آلودگی نیکل در خاک، مقادیر برآورد شده نرخ گیاه پالایی نیکل توسط کلم زینتی با بهره‌گیری از این رابطه با مقادیر اندازه‌گیری شده دارای

جدول ۲. پارامترهای محاسبه شده مدل‌های پیشنهادی با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا

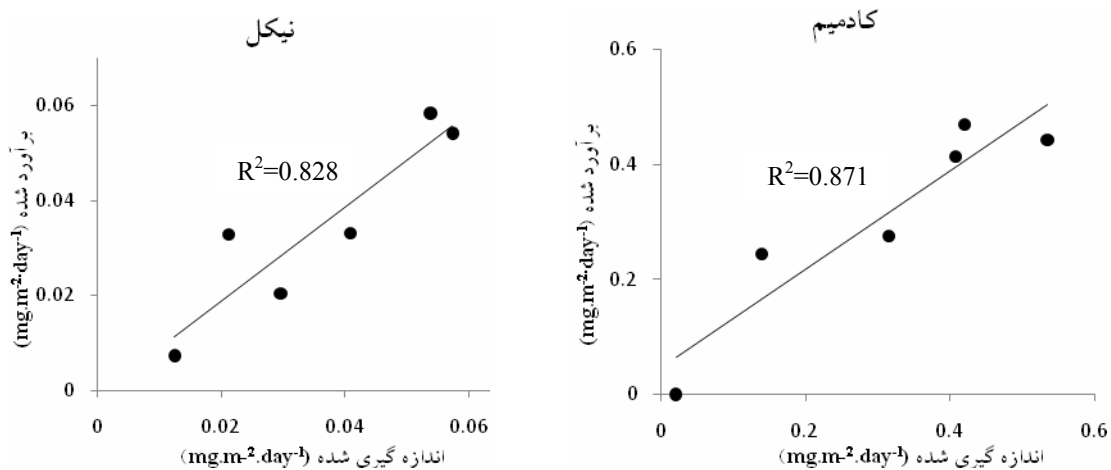
گیاه	فلز	رابطه	$C_{S_{Ni,Cd}}^*$	$C_{S_{Ni,Cd}}(50)$	$C_{S_{Ni,Cd}Max}$	a	P	$\alpha$
کلم زیتنی	نیکل	۴	۲۰	-	-	۰/۰۰۰۷	-	-
		۵	-	۷۱۸/۹	-	-	۱/۳۴۶	-
		۶	۲۰	۷۰۷/۵	-	-	۱/۳۴۱	-
		۷	۲۰	-	۲۰۶۳/۷	-	۱/۳۴۶	۰/۱۹۰
	کادمیم	۴	۱	-	-	۰/۰۱۲۴	-	-
		۵	-	۴۲/۴۷	-	-	۱/۰۰۴	-
		۶	۱	۴۲/۹۶	-	-	۰/۹۲۲	-
شاهی	نیکل	۴	۵۰	-	-	۰/۰۰۰۹	-	-
		۵	-	۵۳۷/۴	-	-	۲/۳۷۶	-
		۶	۵۰	۵۳۳/۸	-	-	۲/۲۱۶	-
		۷	۵۰	-	۱۴۴۰	-	۲/۲۱۶	۰/۰۸۸
	کادمیم	۴	۳	-	-	۰/۰۱۲۴	-	-
		۵	-	۴۲/۰۹	-	-	۱/۲۴	-
		۶	۳	۴۲/۸۷	-	-	۰/۹۷۱	-
		۷	۲/۵۸	-	۷۷/۸۱	-	۱/۰۰	۰/۳۴۸

جدول ۳. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های پیشنهادی (۴)، (۵)، (۶) و (۷)

گیاه	فلز	رابطه	RMSE	CD	EF	ME	CRM
کلم زیتنی	نیکل	۱	۶/۹۲	۰/۹۱۰	۰/۹۹۵	۰/۰۸۶	-۰/۰۴۳
		۲	۴/۰۶	۰/۹۹۰	۰/۹۹۸	۰/۰۶۱	-۰/۰۰۵۷
		۳	۴/۴۹	۰/۹۸۷	۰/۹۸۷	۰/۰۶۵	-۰/۰۰۰۷
		۴	۴/۶۷	۰/۹۷۲	۰/۹۷۲	۰/۰۶۳	-۰/۰۱۳
	کادمیم	۴	۶/۹۲	۰/۹۰۹	۰/۹۹۵	۰/۰۸۶	-۰/۰۴۳
		۵	۴/۰۶	۰/۹۸۹	۰/۹۹۸	۰/۰۶۱	-۰/۰۰۵۷
		۶	۴/۴۸	۰/۹۸۷	۰/۹۹۸	۰/۰۶۵	-۰/۰۰۰۷
شاهی	نیکل	۱	۹/۳۳	۱/۰۰۴	۰/۹۴۵	۰/۱۰۵	-۰/۰۱۲
		۲	۸/۰۷	۰/۹۶۷	۰/۹۵۹	۰/۱۳۱	-۰/۰۱۴
		۳	۸/۳۱	۰/۹۴۱	۰/۹۵۶	۰/۱۴۳	-۰/۰۲۰
		۴	۷/۲۵	۰/۹۷۸	۰/۹۶۱	۰/۱۴۳	-۰/۰۲۵
	کادمیم	۴	۸/۶۸	۰/۹۳۷	۰/۸۸۱	۰/۱۴۶	-۰/۰۲۶
		۵	۵/۵۹	۱/۰۸	۰/۹۵۰	۰/۰۷۶	۰/۰۰۹
		۶	۴/۴۶	۱/۰۲۸	۰/۹۶۷	۰/۰۶۲	-۰/۰۰۰۴
		۷	۴/۴۵	۱/۰۲۹	۰/۹۶۷	۰/۰۶۱	-۰/۰۰۰۳



شکل ۳. مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ گیاه پالایی نیکل و کادمیم از خاک توسط کلم زیتنی در برابر مقادیر برآورد شده آنها



شکل ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ گیاه پالایی آلاینده‌های نیکل و کادمیم از خاک توسط شاهی در برابر مقادیر برآورد شده آنها

مقادیر اندازه‌گیری شده آن هم‌بستگی معنی‌داری دارد ( $R^2=0/87$ ). این نتایج، با نتایج حاصل از بخش پیشتر که مدل پیشنهاد شده توانایی کمی کردن نرخ گیاه پالایی آلاینده کادمیم را توسط کلم زیتنی دارا نبود، سازگار نیست. این موضوع شاید به این دلیل باشد که برخلاف کلم زیتنی، گیاه شاهی بیش‌اندوز کادمیم بوده و به شدت تمایل به جذب و اندوزش این آلاینده از خاک دارد. بنابراین، به نظر می‌رسد با وجود پایین بودن غلظت کادمیم در فاز محلول خاک و وجود اندکی خطا در قرائت آن،

نیکل و کادمیم از خاک توسط شاهی - که با استفاده از رابطه ۱۰ به دست آمده است- در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آنها ارائه شده است.

شکل ۴ نشان می‌دهد رابطه ۱۰ برآوردهایی قابل قبول از نرخ گیاه پالایی نیکل توسط شاهی در کل سطوح آلودگی نیکل در خاک ارائه می‌دهد ( $R^2=0/83$ ).

هم‌چنین، شکل ۴ نشان می‌دهد برآوردهای نرخ گیاه پالایی کادمیم توسط رابطه ۱۰ در کل سطوح آلودگی کادمیم خاک با



مدل پیشنهادی از ترکیب توابع تعرق نسبی گیاه و غلظت کادمیم در فاز محلول خاک حاصل شده است، که به نظر می‌رسد در صورت دسترسی به اندازه‌گیری‌های مناسب از غلظت آلاینده‌ها در فاز محلول خاک، برآوردهایی دقیق از نرخ گیاه پالایی این آلاینده‌ها به ما ارائه دهد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از توابع کاهش تعرق نسبی گیاه، مدلی کلان برای گیاه پالایی آلاینده‌های نیکل و کادمیم توسط دو گیاه کلم زیتنی (*Brassica oleracea var. Viridis*) و شاهی (*Lepidum sativum*) ارائه شد. نتایج نشان داد برای کمی کردن روند تغییرات تعرق نسبی دو گیاه کلم زیتنی و شاهی در سطوح مختلف آلودگی نیکل و کادمیم در خاک، تابع غیرخطی و بدون آستانه (مدل ۵) سازگاری بالایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. افزون بر این، نتایج نشان داد مدل (۱۰) که خود از ترکیب روابط ۵ و ۹ به دست آمد این توانمندی را داشت که نرخ گیاه پالایی آلاینده نیکل را توسط کلم زیتنی و نرخ گیاه پالایی آلاینده‌های نیکل و کادمیم را توسط شاهی با دقت بالایی برآورد نماید. هر چند، این مدل پیشنهادی نتوانست مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ گیاه پالایی کادمیم خاک را به وسیله کلم زیتنی تبیین کند.

مدل پیشنهاد شده توانمندی آن را داشته باشد که برآوردهایی دقیق از نرخ گیاه پالایی کادمیم توسط شاهی فراهم نماید. در مجموع نتایج حاصل نشان داد گرچه با بهره‌گیری از مدل تغییرات تعرق نسبی گیاه، امکان دستیابی به برآوردهایی دقیق از نرخ گیاه پالایی کادمیم توسط کلم زیتنی وجود ندارد. لیکن، مدل پیشنهادی (۱۰) این توانمندی را دارد که نرخ گیاه پالایی نیکل توسط کلم زیتنی و نرخ گیاه پالایی نیکل و کادمیم توسط شاهی را با دقت نسبتاً بالایی برآورد کند. این نتایج، با نتایج حاصل از پژوهش خداوردی‌لو و همایی که نرخ گیاه پالایی یک گونه شاهی (*Barbarea verna*) را با استفاده از مدل تغییرات تعرق نسبی گیاه برآورد نمودند سازگاری ندارد (۱). به گونه‌ای که این محققین در پژوهش خود گزارش کردند نرخ گیاه پالایی کادمیم توسط گونه (*Barbarea verna*) با استفاده از مدل تغییرات تعرق نسبی، هم‌بستگی معنی‌داری با مقادیر اندازه‌گیری شده ندارد ( $R^2=0/46$ ) این امر را شاید بتوان به مدل پیشنهاد شده توسط این محققین که بر مبنای توابع تعرق نسبی گیاه و غلظت کادمیم کل در خاک اشتقاق یافته بود نسبت داد. به عبارت دیگر، این محققین کادمیم موجود در فاز محلول خاک را به عنوان بخشی از غلظت کادمیم کل در نظر گرفته و مقدار آن را با استفاده از رابطه‌ای خطی پیش‌بینی کردند. بنابراین، این احتمال که در برآورد غلظت کادمیم موجود در فاز محلول خاک خطا وجود داشته باشد چندان دور از واقعیت نیست. در حالی که در این پژوهش،

### منابع مورد استفاده

۱. خداوردی‌لو، ح. و م. همایی. ۱۳۸۷. مدل‌سازی پالایش سبز کادمیم و سرب از خاک‌های آلوده با استفاده از توابع کاهش تعرق گیاه. مجله آبیاری و زه‌کشی ایران ۲(۱): ۷-۱۶.
۲. علی‌احیایی، م. ۱۳۷۶. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک (جلد دوم). نشریه شماره ۱۰۲۴، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، وزارت کشاورزی، تهران.
۳. علی‌احیایی، م. و ع. ا. بهبهانی زاده. ۱۳۷۲. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک (جلد اول). نشریه شماره ۸۹۳، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، وزارت کشاورزی، تهران.
4. Adriano, D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Springer-Verlag, New York.
5. Chang, Y.Y and M.Y. Corapcioglu. 1998. Plant-enhanced subsurface bioremediation of nonvolatile hydrocarbons. ASCE J. Environ. Eng. 124: 162-169.

6. Ensley, B. D. 2000. Rationale for use of phytoremediation. PP. 3–11. *In*: Raskin, I., Ensley, B.D. (Eds.), *Phytoremediation of Toxic Metals using Plants to Clean up the Environment*. John Wiley & Sons Inc., New York.
7. Feddes, R. A., P. Kowalik and H. Zarandy. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.
8. Gunningham, S. D., J. R. Shan and D. Crowley. 1997. *Phytoremediation of contaminated water and soil*. American Chemical Society, Washington, DC.
9. Gupta, P. K. 2000. *Soil, plant, Water and Fertilizer Analysis*. Agrobios, New Delhi, India.
10. Homae, M. and U. Schmidhalter. 2008. Water integration by plants root under non-uniform soil salinity. *Irrig. Sci.* 27: 83-95.
11. Homae, M., C. Dirksen and R. A. Feddes. 2002. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity stress. *Agric. Water Manag.* 57: 89-109.
12. Kabata-Pendias, A. 2001. *Trace Elements in the Soil and Plants*. CRC Press, Boca Raton.
13. Maas, E. V. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* 103: 115-134.
14. Prasad, M. N. V. 2004. Phytoremediation of metals and radionuclide's in the environment: the case for natural hyperaccumulators, metal transporters, soil-amending chelators and transgenic plants. PP. 345–391. *In*: Prasad, M.N.V. (Ed.), *Heavy Metal Stress in Plants from Biomolecules to Ecosystems*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer-Verlag, Berlin.
15. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics.* 1: 318-333.
16. Salt, D. E., M. Blaylock, N. P. Kumar, V. Dushenkov, B. D. Ensley, I. Chet and I. Raskin. 1995. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plant. *Biotechnol.* 13:468–474.
17. Tanhan, P., M. Kruatrachue, P. Pokethitiyook and R. Chaiyarat. 2007. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson]. *Chemosphere* 68: 323–329