مدل‌سازی پالایش‌سبز سرب و کادمیم از خاک‌های آلوده

حبیب خداوردی‌لو و مهدی همایی

به ترتیب عضو هیات علمی دانشگاه ارومیه، دانشکده کشاورزی، گروه خاکشناسی *hkhodaverdiloo@yahoo.com* و دانشیار دانشگاه تربیت مدرس.

مقدمه

پالایش‌سبز (Phytoremediation) روشی نوین برای زدودن آلودگی‌های خاک و آب است [۲] که در مقایسه با سایر روش‌های پالایش، بسیار کم‌هزینه و ساده است. مدل‌های پالایش‌سبز برای شناخت بیشتر فرایندهای حاکم بر پدیده‌ی پالایش و مدیریت خاک‌های آلوده اهمّیت ویژه‌ای دارند. بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون به دلیل پیچیدگی پیوستار خاک- گیاه- نیوار، مدل‌هایی اندک برای پالایش‌سبز پیشنهاد شده‌اند[۴]. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی پالایش‌سبز خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم بود. بدین منظور، مدلی نوین بر مبنای رفتار خاک و گیاه نسبت به سطوح متغیر آلاینده‌ها ارایه شد. در این مدل، هم‌دمای برون‌جذبی (Adsorption isotherm) خاک بیانگر رفتار خاک در برابر آلاینده و تغییرات نرخ جذب آلاینده به وسیله گیاه، بازتاب رفتار گیاه در برابر آلاینده در نظر گرفته شد و مدل‌های ساده‌ای برای برآورد زمان لازم برای پالایش آلاینده‌ها پیشنهاد گردید.

مواد و روشها

ضریب توزیع خاک (Soil Distribution Coefficient, K_{SD}) ($l\ kg^{-1}$) با برازش مدل هم‌دمای برون‌جذبی خطی (Linear) بر مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی جذب سرب و کادمیم در غلظت‌های مختلف محلول تعادلی به دست آمد [۱]:

$$S = K_{SD} C \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی بالا S، مقدار آلاینده‌ی جذب شده در واحد جرم خاک ($mg\ kg^{-1}$)، C، غلظت محلول‌های تعادلی ($mg\ l^{-1}$) است.

خاکی با بافت لوم شنی با غلظت‌های مختلف سرب و کادمیم آلوده شد. گیاهان شاهی (*Barbarea verna*) و اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) پس از کاشت در پنج بازه‌ی زمانی برداشت شدند. غلظت کل سرب و کادمیم در گیاه و خاک به ترتیب با روش اکسیداسیونِ تر و اکسیداسیون با اسید نیتریک ۴ مولار عصاره‌گیری و با دستگاه‌های جذب اتمی و کوره‌ی گرافیتی اندازه‌گیری شد [۳].

برای مدل‌سازی پالایش‌سبز نظریه‌ی نوینی بر مبنای رفتار خاک (هم‌دمای برون جذبی خاک) و گیاه (نرخ جذب آلاینده به وسیله گیاه) در برابر آلاینده‌ها ارایه شد. بدین شکل که اگر نرخ پالایش‌سبز آلاینده را مقداری از آلاینده در نظر گرفته شود که گیاه در واحد زمان از واحد حجم خاک می‌پالاید، آنگاه می‌توان نوشت:

$$Vr_{\circ} = \frac{dM_v}{dt} = \frac{d\left[V\left(S\rho_b + C\theta\right)\right]}{dt} \Rightarrow r_{\circ} = \frac{d\left(S\rho_b + C\theta\right)}{dt} \qquad (۲)$$

که در آن M_v (M) کل جرم آلاینده در حجم V از خاک، S (MM^{-1}) جرم آلاینده‌ی جذب شده در واحد جرم بخش جامد خاک، ρ_b (ML^{-3}) جرم‌ویژه‌ی ظاهری خاک، C (ML^{-3}) غلظت آلاینده در محلول خاک و θ (L^3L^{-3}) رطوبت حجمی خاک، $r_{\circ}$ ($ML^{-3}T^{-1}$) نرخ پالایش سبز آلاینده و t (T) زمان است.

با قرار دادن S از رابطه (۱)، بازنویسی رابطه‌ی (۲) و انتگرال گیری از معادله‌ی دیفرانسیلی از کران‌های $C = C_0$ تا $C = C_f$ و $t = 0$ تا $t = t_r$ داریم:

$$\int_{C_0}^{C_f} dC = \frac{r_{\circ}}{\left(K_{SD}\rho_b + \theta\right)} \int_0^{t_r} dt \qquad (۳)$$

که در آن C_0 غلظت آلاینده در زمان آغاز پالایش، C_f غلظت مجاز آلاینده در خاک و یا غلظت دلخواه و t_r زمان لازم برای پالایش است.

حال با قرار دادن r_0 به عنوان تابع مرتبه‌ی صفر ($r_0 = -\frac{\Delta C}{\Delta t} = k_0 \Rightarrow r_0 = -k_0$)، مرتبه‌ی یک ($r_0 = -\frac{\Delta C}{\Delta t} = k_1 C \Rightarrow r_0 = -k_1 C$) و مرتبه‌ی دو ($r_0 = -\frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{k_2}{C} \Rightarrow r_0 = -\frac{k_2}{C}$) زمان لازم برای پالایش C آلاینده به ترتیب به قرار زیر بدست می آید:

$$t_r = \frac{(K_{SD}\rho_b + \theta)}{k_0}(C_0 - C_f) \qquad (۴)$$

$$t_r = \frac{(K_{SD}\rho_b + \theta)}{k_1}\ln\frac{C_0}{C_f} \qquad (۵)$$

$$t_r = \frac{(K_{SD}\rho_b + \theta)}{2k_2}\ln(C_0^2 - C_f^2) \qquad (۶)$$

ضرایب k_0 ($ML^{-3}T^{-1}$)، k_1 (T^{-1}) و k_2 ($M^2L^{-6}T^{-1}$) در روابط فوق با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا برای هر گیاه و هر فلز به دست آمد.

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده، برازش مناسب مدل خطی بر هم‌دمای برون‌جذبی سرب و کادمیم را به خوبی نشان داد. مقدار ضریب K_{SD} برای سرب و کادمیم با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا بترتیب ۲۲/۷۴ و ۲۳/۱۷ ($l\ kg^{-1}$) بدست آمد.

اعتبارسنجی کمّی مدل‌ها در برآورد مدت زمان لازم برای پالایش‌سبز سرب و کادمیم از خاک نشان داد که رابطه (۵) از کارآیی بالایی در برآورد زمان پالایش‌سبز سرب از خاک به وسیله شاهی ($RMSE$ = ۱۴۰ و R^2 = ۰/۹۹) و اسفناج ($RMSE$ = ۱۹۲۲ و R^2 = ۰/۹۸) برخوردار است. مقدار k_1 برای شاهی و اسفناج به ترتیب برابر با $۱/۷۱\times۱۰^{-۲}$ و $۰/۱۶\times۱۰^{-۲}$ (Yr^{-1}) بدست آمد. همچنین، نتایج نشان داد که هر چند در مورد کادمیم رابطه (۴) کارآمدتر از دو رابطه‌ی دیگر است، اعتبار کمتری دارد (R^2 < ۰/۷۰). این امر را می‌توان به حلالیت بالای کادمیم در خاک نسبت داد. زیرا، بخشی از کادمیم موجود در خاک می‌تواند با جریان ترجیحی (که در مدل گنجانده نشده است) از ریشه‌راه‌های بوجود آمده در خاک از منطقه‌ی ریشه‌دهی گیاه خارج گردد. با وجود این، برای دست یافتن به برآوردهایی کلّی از زمان پالایش کادمیم از خاک می‌توان از رابطه (۴) استفاده کرد.

منابع

[1] Adhikari, T. and M. V. Singh. 2003. Sorption characteristics of lead and cadmium in some soils of India. Geoderma 114: 81–92.

[2] Glick, B. R. 2003. Phytoremediation: Synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. Biotech. Adv. 21: 383-393.

[3] Gupta, P. K. 2000. Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis. Agrobios, New Delhi, India, 438p.

[4] Mathur, S. 2004. Modelling phytoremediation of soils. Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management, 8(4): 286-297.