

بررسی پتانسیل خاک لندفیل ارومیه به‌منزله لاینر جاذب کادمیوم در ساخت لندفیل مهندسی - بهداشتی

فریبا عیسوند^۱، بهنام دولتی^{۲*}، حسین پیرخراطی^۳، کاظم بدو^۴ و خلیل فرهادی^۵

f.eisavand@gmail.com

۱. کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

Pirkharrati2002@yahoo.com

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

k.badv@urmia.ac.ir

۴. استاد گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

Khalil.farhadi@yahoo.com

۵. استاد گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۳/۱۶

تاریخ وصول مقاله: ۹۲/۳/۶

چکیده

یکی از مشکلات زیست‌محیطی دفن زباله‌ها، غلبه بر حجم بالای شیرابه زباله‌هاست که به طور همزمان یا پس از دفن در اثر رطوبت اولیه زباله و نفوذ بارندگی در محل دفن به وجود می‌آید. به این منظور برای تثبیت و نگهداری Cd در پی لاینرهای رسی، از خاک‌های رسی استفاده شد. در این تحقیق خاک‌های مورد مطالعه از سه منطقه نزدیک و فاقد آلودگی تهیه و آنالیزهای فیزیکوشیمیایی و مکانیکی خاک‌ها انجام شدند. همچنین به منظور ارزیابی پتانسیل جذبی خاک‌ها، مطالعات جذب و واجذب Cd، بر اساس تکنیک Batch بررسی شد. نتایج نشان داد که داده‌های جذبی نسبت به مدل لانگمویر و فروندلیچ برازش داده شدند. بر اساس ضرایب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE)، داده‌های جذبی نسبت به مدل لانگمویر برازش بهتری را نشان دادند. بیشترین مقدار جذب Cd در خاک شماره ۱ و کمترین مقدار آن در خاک شماره ۲ مشاهده شد. لذا بیشتر بودن مقادیر پارامترهای جذبی خاک ۱ نسبت به سایر خاک‌ها حاکی از پتانسیل جذبی بالای آن است. همچنین، همبستگی پارامترهای جذبی با ویژگی‌های مهندسی نشان داد که خاک ۱ برای لاینر مهندسی - بهداشتی مناسب‌تر است.

کلیدواژه

جذب سطحی، دفن زباله، کانی‌های رسی، هم‌دماهای جذبی کادمیوم.

۱. سرآغاز

محل دفن به وجود می‌آید. یکی از روش‌های مناسب و ارزان‌قیمت احداث و ساخت مدفن زباله‌های شهری، استفاده از خاک‌های رسی با ویژگی‌های مناسب مکانیکی و شیمیایی به ویژه محتوی درصد بالایی از رس است. سیستم چند لایه رسی لندفیل زباله‌های خانگی و صنعتی به‌منزله سد ژئوشیمیایی هیدرولیکی، برای جلوگیری از انتقال فلزات سنگین به آبخوان‌های زیرین عمل می‌کنند (Roehl and Czurda, 1998). هسته رسی در بستر محل

کادمیوم یکی از فلزات سنگین است و در شیرابه زباله‌های شهری به‌منزله آلاینده محیط‌زیست به وفور یافت می‌شود. آب‌های اسیدی حاصل از نزولات جوی می‌توانند عناصر موجود در زباله را حل کنند و با نفوذ در سفره‌های آب زیرزمینی سبب آلودگی آن‌ها شوند. لذا غلبه بر حجم بالای شیرابه یکی از مشکلات زیست‌محیطی است که همزمان و پس از دفن در نتیجه رطوبت اولیه زباله و نفوذ بارندگی در

مطالعات انجام شده، از مهم‌ترین مکانیسم‌های جذب برای Cd تشکیل کمپلکس‌های سطحی با کلسیت و اکسیدهای آلومینیوم، آهن و منگنز است که در غلظت‌های پایین کادمیوم ($M > 5-10$) اتفاق می‌افتد (Brummer, et al., 1988). همچنین، مکانیسم کنترل‌کننده جذب Cd در غلظت‌های بالا ($M < 5-10$)، احتمالاً فرایند جذب غیراختصاصی از قبیل تبادل کاتیونی است. یکی از روش‌های مناسب در این زمینه مطالعه هم‌دماهای جذب سطحی است. در این روش بررسی برهم‌کنش‌های بین جذب شونده و سطح جاذب و آگاهی از ساختار لایه‌های جذب شونده امکان‌پذیر خواهد بود (فیروزبخت، ۱۳۸۸). لذا در این مطالعه از روش جذب سطحی بر اساس کارایی و کاربرد آسان آن به‌منزله پرکاربردترین روش حذف فلزات سنگین استفاده شده است (Zhou, et al., 2004). از آنجا که منطقه مورد مطالعه فاقد تأسیسات مهندسی و بهداشتی است و پس از کوچک‌ترین بارندگی موجب جاری شدن شیرابه، بوی آزاردهنده، هجوم انواع حشرات و جوندگان و پرندگان، چشم‌انداز نامناسب منطقه و در نهایت آلودگی محیط‌زیست می‌شود، ایجاد یک مدفن مهندسی - بهداشتی مناسب برای زباله‌های شهری لازم و ضروری است. در این مطالعه به منظور انتخاب بستر مناسب خصوصیات مهندسی - شیمیایی خاک‌ها توأم با هم‌دماهای جذبی Cd بررسی شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. نمونه خاک

نمونه‌های مورد مطالعه از مناطق فاقد آلودگی اطراف محل دفن زباله، از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک برداشت شدند. نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی پس از خشک‌شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. مختصات جغرافیایی محل نمونه‌برداری خاک‌ها در جدول ۱ داده شده است. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و مکانیکی خاک با استفاده از روش‌های استاندارد به شرح زیر اندازه‌گیری شدند.

دفن به‌منزله فیلتر عمل و از آلودگی محیط نسبت به عناصر سنگین جلوگیری می‌کند. از این رو محققان خاک‌های رسی را که چسبندگی بیشتری دارند برای ساخت لاینرهای رسی استفاده می‌کنند. کانی‌های رسی به دلیل داشتن سطوح جذب اختصاصی بالا و جایگاه‌های پیوندی با تعداد بیشتری از بارهای منفی، ظرفیت بالایی در جذب فلزات سنگین دارند. فرایند جذب از طریق کانی‌ها شامل جذب سطحی، تبادل یونی، واکنش‌های کمپلکس و رسوب عناصر است و ارتباط تنگاتنگ با مقدار و نوع کانی‌های رسی دارد. همچنین، قدرت تثبیت، اهمیت زیادی در امکان تحرک مجدد عناصر دارد و به شدت تحت تأثیر پارامترهای غلظت، قابلیت حل‌شدگی، Eh، pH، کانه‌آرایی، سطوح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی است (Czurda and Wagner, 1991). فرایندهای جذب و واجذب رس‌ها به مقدار و نوع بارهای موجود در سطح رس‌ها وابسته است. برخی از بارهای موجود در سطح ذرات اعم از ذرات آلی یا معدنی به pH وابسته‌اند و با کاهش pH تعداد مکان‌های بار منفی تقلیل می‌یابد. در شرایط اسیدی، بیشتر سطوح وابسته به pH، دارای بار مثبت‌اند و در pHهای قلیایی این سطوح با بار منفی شارژ می‌شوند (McLean, 1992). محققان کاهش و افزایش عناصر جذب‌شده در بخش اکسیدی را به تغییرات pH ارتباط دادند و اعلام کردند که Cd با پیوندی ضعیف به بخش تبدالی و اکسیدهای Mn و Fe متصل شده است و تحت تأثیر تغییر شرایط از قبیل کاهش pH و اکسایش و کاهش به راحتی آزاد می‌شود (Pavel, et al., 2010). همچنین، خواص فیزیکی خاک از قبیل عمل‌درزگیری و مقاومت برشی نیز شدیداً وابسته به ترکیب (توزیع دانه‌بندی و کانی‌های سازنده) و کیفیت ساختاری (چگالی، نسبت تراکم و درصد رطوبت) رس‌هاست (Negro, et al. 2009).

بررسی این پارامترها در پیش‌بینی و کنترل رفتار فلزات سنگین در لاینر رسی و جلوگیری از ورود این عناصر به آبخوان‌های زیرزمینی حائز اهمیت است. بر اساس

جدول ۱. مختصات جغرافیایی محل نمونه‌برداری

کد نمونه	مختصات جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)
۱	۳۷°، ۴۴'، ۱۴" N	۱۴۴۹
	۴۵°، ۰۰'، ۵۵" E	
۲	۳۷°، ۴۳'، ۵۹" N	۱۴۵۱
	۴۵°، ۰۱'، ۱۴" E	
۳	۳۷°، ۴۳'، ۴۲" N	۱۴۶۶
	۴۴°، ۰۱'، ۰۶" E	

۲.۲. آزمایش‌های شیمی خاک

خصوصیات شیمیایی نمونه‌ها از قبیل ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات آمونیوم یک مولار (Chapman, 1965)، pH به روش کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار با نسبت ۱:۲/۵ (Blakemore, et al., 1981)، کربن آلی (OM) به روش واکلی بلک (Tandon, 1998)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون (Jackson, 1964) و هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره گل اشباع تعیین شد.

۳.۲. آزمایش‌های مکانیک خاک

تعیین بافت خاک: ۴۰ گرم خاک در یک ارلن مایر ۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته و به آن ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول هگزامتافسفات سدیم ۵ درصد و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت، سوسپانسیون به سیلندر یک لیتری انتقال داده و با آب مقطر به حجم یک

لیتر رسانیده شد. پس از هم‌زدن قرائت‌های ۴۰ ثانیه و دو ساعت انجام شد. پس از تصحیح دمایی و غلظت هگزامتافسفات سدیم، درصد رس، سیلت و شن محاسبه شد (Bouyoucos, 1962).

تعیین دانه‌بندی خاک: دانه‌بندی خاک مورد مطالعه به روش استانداردهای ASTM D-421 و ASTM D-422، حدود اتبرگ بر اساس استاندارد ASTM D-4318، چگالی ویژه به روش استاندارد ASTM D-854 و تراکم بر اساس استاندارد ASTM D-698 برای خاک‌های مورد مطالعه انجام شد (جدول ۲).

تعیین رطوبت بهینه: رطوبت بهینه (ω_{opt}) مقدار رطوبتی است که خاک در آن به بیشترین دانسیته خشک ماکزیم خود می‌رسد. مقدار آن با قراردادن بیشترین مقدار دانسیته خشک ماکزیم در معادله منحنی تراکم محاسبه شد.

جدول ۲. مشخصات آزمایش پروکتور استاندارد

مشخصات	حجم قالب (cm ³)	ارتفاع قالب (mm)	قطر قالب (mm)	جرم چکش (kg)	ارتفاع سقوط (mm)	تعداد لایه‌ها	تعداد ضربات در هر لایه	شماره الک
مقادیر	۹۴۳/۹	۱۱۶/۳۳	۱۰۱/۶	۲/۵	۳۰۴/۸	۳	۲۵	۴

به یکدیگر برسند. حد خمیری نیز از میانگین درصد رطوبت آزمایش فیتله ۳/۲ میلی‌متری تعیین شد (طاحونی، ۱۳۷۱).

تعیین حد روانی خاک: برای تعیین حد روانی خاک‌ها از رسم مقادیر تعداد ضربات در مقابل درصد رطوبت خاک استفاده شد. حد روانی رطوبتی است که در آن به ازای ۲۵ ضربه کاساگرانده، ناحیه میانی خاک در طول ۱۲/۷ میلی‌متر

۴.۲ هم‌دماهای جذبی

به منظور بررسی واکنش‌های جذبی Cd از آزمون‌های Batch استفاده شد. محلول Cd در غلظت‌های ۰، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر با زمینه کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار تهیه و با نسبت ۱:۲۰ به نمونه‌های خاک اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تکان داده شدند. پس از اتمام زمان تعادل، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه با دور ۳۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شدند. سوسپانسیون حاصله از طریق فیلتر غشایی با اندازه منفذ ۰/۲ μm صاف و غلظت تعادلی (C_e) کادمیوم از طریق دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی Shimadzu مدل A-A6300 اندازه‌گیری شد (ASTM; D4646-87, 2001). مقادیر جذب‌شده از رابطه ۱ محاسبه و منحنی هم‌دماهای جذبی در محیط Excel رسم شد.

$$Q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{Ms} \quad (1)$$

به منظور توصیف مقادیر جذب‌شده Cd روی سطوح جذبی کانی‌های رس، هم‌دماهای جذبی هر یک از نمونه‌ها با مدل‌های مبتنی بر تعادل فروندلیچ و لانگمویر برآزش داده شدند. مدل جذبی فروندلیچ (معادله ۲) یکی از مدل‌های تجربی و مبتنی بر تعادل و برای سیستم‌های تک‌محلولی است که سطح جاذب را ناهمگن فرض می‌کند (Freundlich, 1928).

$$Q = K_f C_e^{1/n} \quad (2)$$

در معادله بالا K_f و n ثابت‌های فروندلیچ و به ترتیب بیانگر ظرفیت و شدت جذب و Q مقدار کادمیوم جذب‌شده در سطح ذرات رس است. معادله جذب لانگمویر نیز برای جذب تک‌لایه‌ای روی سطوح با تعداد متناهی سایت‌های

جذبی یکسان معتبر است و به صورت معادله ۳ نمایش داده شده است (Namasivayam, et al., 1995):

$$Q = \frac{bKC_e}{1 + KC_e} \quad (3)$$

در این معادله C_e غلظت تعادلی (mg l⁻¹)، Q مقدار ماده جذب‌شده در حالت تعادل (mg kg⁻¹) و K و b ثابت‌های لانگمویرند که به ترتیب بیانگر قدرت اتصال جذب و حداکثر ظرفیت جذب‌شونده‌اند. ضرایب معادلات مدل فروندلیچ (K_f, n) و لانگمویر (K_i, b) محاسبه شدند.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. خصوصیات خاک

خصوصیات شیمیایی نمونه‌های خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۳ داده شده است. نتایج نشان داد تفاوت فاحشی در مقدار کربنات کلسیم خاک شماره ۱ نسبت به سایر خاک‌ها (۲ و ۳) مشاهده شد. کربنات کلسیم از جمله فاکتورهای مهم در جذب فلزات سنگین است و رابطه مستقیم با جذب عناصر دارد و با افزایش آن مقدار جذب بیشتر می‌شود. لذا بیشتر بودن میزان آهک در خاک ۱ می‌تواند سبب افزایش جذب فلزات شود. از دیگر فاکتورهای مهم در فرایندهای جذبی، pH خاک است. محققان اعلام کردند که ویژگی‌های جذب و واجذب فلزات سنگین (Cu و Cd) به pH وابسته‌اند و ۵۰ درصد آن‌ها در محدوده ۵-۷ pH جذب می‌شوند (Katsuhiko and Yanai, 2006). انتظار می‌رود با افزایش pH خاک، مقدار جذب افزایش و واجذب عناصر نیز کاهش یابد. برعکس با کاهش مقدار pH، مقدار رس و آهک خاک، جذب و نگهداری Cd نیز کاهش یابد.

جدول ۳. خصوصیات شیمیایی نمونه‌های خاک

کد نمونه	کلاس بافت خاک	CEC	EC	pH	آهک	مواد آلی	رس	سیلت	شن
		cmolckg ⁻¹	dSm ⁻¹	0.01M CaCl ₂	%				
۱	Silty Clay	۲۹	۵/۶	۷/۱۷	۱۶/۷	۰/۲۶	۴۳/۹	۵۵	۱/۱۲
۲	Sandy loam	۱۸	۰/۶۷	۷/۵۳	۳/۶۴	۰/۶۸	۱۹/۲	۱۱/۳	۶۹/۲
۳	Sandy Clay Loam	۱۹	۱/۱۱	۶/۵۶	۴/۶۸	۱/۱۷	۲۹/۲	۲۰	۵۰/۸

جاذب (رس) و در نتیجه ظرفیت جذب افزایش می‌یابد. از دیگر خواص عملیاتی مهم جاذب‌ها بیشتر بودن دانسیته ظاهری و مقاومت در برابر سائیدگی و شکستگی است (فیروزبخت، ۱۳۸۸). خاک‌هایی که مقادیر رس بیشتری دارند به دلیل جذب آب و ایجاد حائل در اطراف ذرات، در مقابل نیروهای وارده مقاومت بیشتری و در ساخت لاینرهای مهندسی - بهداشتی عملکرد بهتری نشان می‌دهند. اصطلاح لاینر رسی متراکم شده (CCL) برای همه لاینرهای معدنی که غالباً از خاک‌های ریزدانه مثل رس‌ها، رس‌های سیلتی و سیلت‌های رسی ساخته شده‌اند، استفاده می‌شود (Negro, et al. 2009). لذا برای ساخت لاینر رسی لندفیل، از خاک‌هایی که دارای بیش از ۲۰ درصد رس هستند استفاده می‌شود و این ۲۰ درصد بایستی به شکل یکنواخت در منحنی دانه‌بندی ظاهر شود (Environment Agency, 1990) (جدول ۴).

بیشترین مقدار ماده آلی (۱/۱۷ درصد) در خاک ۳ مشاهده شد. کمپلکس بین فلز و مواد آلی محلول به رقابت بین پیوند فلز با مکان‌های جذبی و لیگاند آلی محلول وابسته است. فلزاتی که به آسانی کمپلکس‌های پایدار با مواد آلی محلول تشکیل می‌دهند، در خاک متحرک‌اند. محققان اعلام کردند با تشکیل کمپلکس بین کادمیوم و مواد آلی - معدنی، یون کادمیوم از طریق ذرات خاک با نیروی کمتری از طریق رس‌ها نگهداری می‌شود و دلیل آن حضور لیگاندهای معدنی Cl^- و SO_4^{2-} است که مانع جذب کادمیوم از طریق ذرات خاک می‌شود (Oconnor, et al., 1984; Benjamin and Leckie, 1982). نتایج نشان داد بیشترین مقدار رس و ظرفیت تبدلی مربوط به خاک ۱ بود. همچنین، بین مقادیر رس و CEC خاک‌ها رابطه مثبت و مستقیمی مشاهده شد. مقدار، نوع و اندازه ذرات رس از جمله پارامترهای مؤثر در فرایند جذب سطحی است. لذا با افزایش تخلخل و کاهش اندازه ذرات، سطح ویژه داخلی

جدول ۴. خصوصیات مکانیکی نمونه‌های خاک

کد نمونه	۱	۲	۳
حد روانی (W_L)	۳۰/۹	۲۲/۵	۲۵/۳
حد خمیری (W_p)	۱۵/۸	۱۴	۱۴/۵
شاخص خمیری (PI)	۱۵/۱	۸/۵	۱۰/۸
چگالی ویژه (Gs)	۲/۷۳	۳/۰۱	۲/۸۹
ماکزیمم دانسیته خشک (Kg/m^3)	۱۸۸۲	۱۸۴۱	۱۷۹۱
رطوبت بهینه (%)	۱۴/۲	۱۷	۱۶

به منظور جلوگیری از نشت و نفوذ مایعات به درون سیستم لندفیل و انتخاب بهترین درصد تراکم برای لاینر رسی، آگاهی از میزان رطوبت بهینه لازم و ضروری است (طاحونی، ۱۳۷۱). نمودار تراکم خاک، ارتباط بین درصد رطوبت بهینه (w_{opt}) و دانسیته خشک ماکزیمم ($\gamma_{d_{max}}$) را نمایش می‌دهد. نتایج آزمون پروکتور استاندارد روی نمونه خاک‌های مورد مطالعه نشان داد، خاک ۱ نسبت به خاک ۲

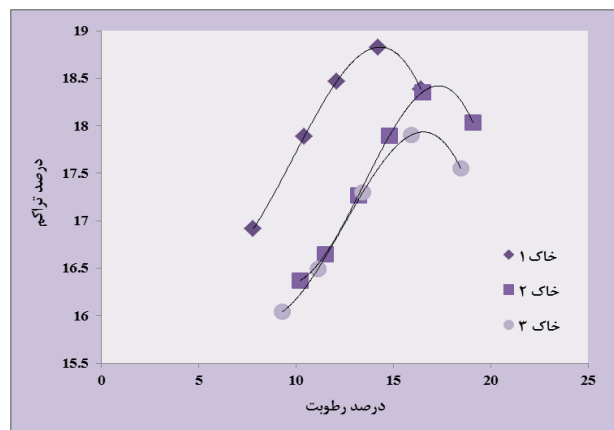
نتایج نشان داد که بیشترین مقدار حد خمیری مربوط به خاک ۱ است (شکل ۱). همچنین، نتایج آزمون حدود اتربرگ نشان داد که خاک ۱ و ۳ دارای شاخص خمیری بیش از ۱۰ است. طبق استانداردهای آژانس محیط‌زیست، شاخص خمیری در لاینر رسی بایستی بین ۱۰ تا ۶۵ واحد باشد (Environment Agency, 1990; Jones, et al., 2006).

است که این مقدار در خاک ۱ نسبت به سایر خاک‌ها بیشتر شد، لذا خاک ۱ برای رسیدن به بیشترین تراکم رطوبت کمتری نیاز داشته و برای ساخت لاینر اقتصادی است (شکل ۲).

و ۳ از نظر رطوبت و دانسیته خشک ماکزیم متفاوت و این اختلاف در نمودار تراکم مشهود است. یکی از ویژگی‌های ارزیابی تراکم نسبت به مقدار رطوبت خاک، برآورد دانسیته خشک در برابر کمترین درصد رطوبت بهینه



شکل ۱. نمودار حد روانی خاک‌های مورد مطالعه



شکل ۲. نمودار تراکم خاک

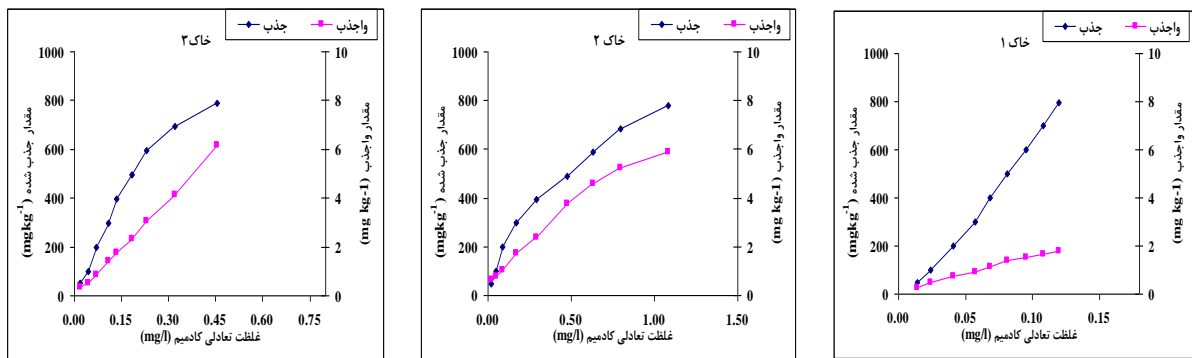
Hendrickson and Corey, 1981; Lehmann and)
(Harter, 1984). نمودارهای جذب برای سایر خاک‌ها خطی نیست و به صورت منحنی (L) ظاهر شد (شکل ۳). با توجه به خطی بودن نمودار جذب خاک ۱ می‌توان گفت که شدت جذب و نگهداری کادمیوم در خاک ۱ نسبت به سایر خاک‌ها بیشتر است. همچنین، علاوه بر مقادیر جذب شده، پتانسیل جذب هنوز هم امکان‌پذیر است. این حاکی از آن است که مکان‌های جذب خاک ۱ به صورت

۲.۳. ویژگی‌های جذب کادمیوم (Cd)

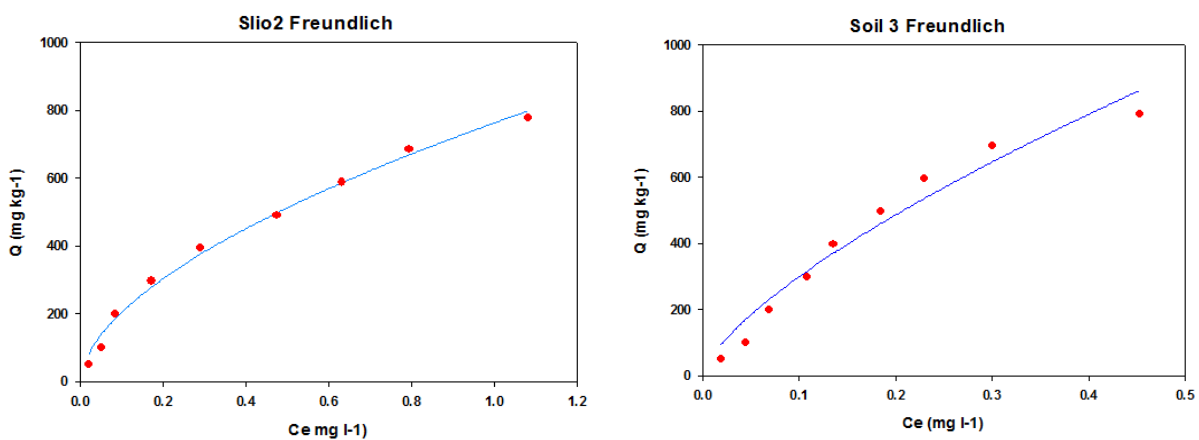
نتایج نشان داد نمودار جذب خاک ۱ به دلیل وجود ظرفیت جذب بیشتر (CEC) به صورت خطی و به شکل C است. احتمالاً در محیط متراکم شده لاینر لندفیل و غلظت‌های کم کادمیوم، جایگاه‌های جذب اختصاصی نسبت به جایگاه‌های غیراختصاصی اهمیت بیشتری داشته و کادمیوم به طور سریع و با قدرت بیشتری در این مکان‌ها جذب می‌شود. نتایج مطالعه محققان نیز تأکیدی بر این مدعا است

به منظور بررسی شدت و مقادیر جذبی کادمیوم، غلظت داده‌های جذبی خاک‌های ۲ و ۳ با استفاده از نرم‌افزار SigmaPlot v12 نسبت به معادلات غیرخطی لانگمویر و فروندلیچ برازش داده شد (شکل‌های ۴ و ۵). برازش داده‌های جذبی خاک ۱ نسبت به معادلات فروندلیچ و لانگمویر به دلیل خطی بودن نمودار جذبی آن ضروری نبوده است و شیب و عرض از مبدأ معادله خطی آن به‌منزله ظرفیت و شدت جذب Cd استفاده شد. مقادیر پارامترهای جذبی معادلات فروندلیچ و لانگمویر در جدول ۵ نشان داده شده است.

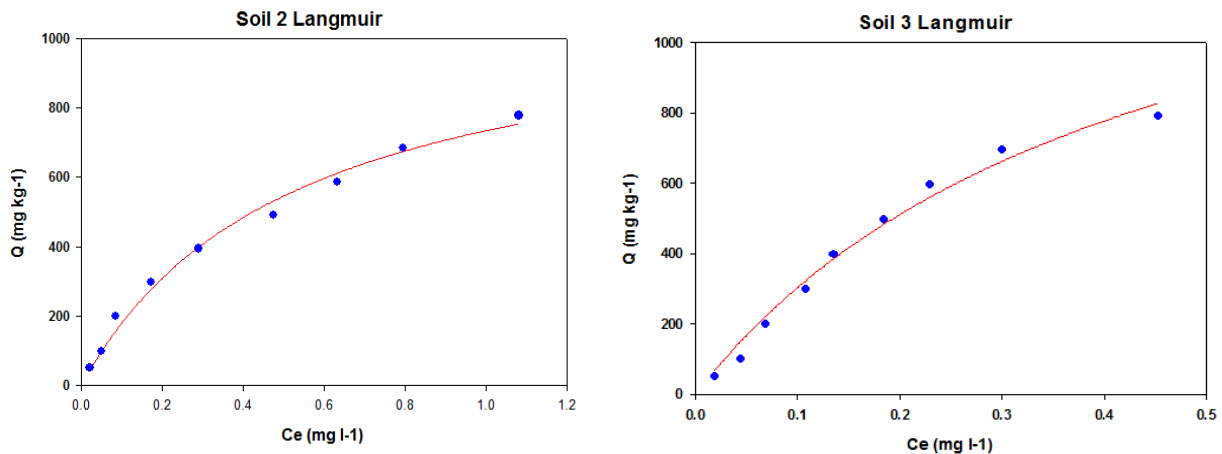
نیمه پر است و جذب کادمیوم هنوز هم ادامه دارد. این در حالی است که مکان‌های جذبی خاک‌های ۲ و ۳ به دلیل کمتر بودن ظرفیت جذبی نسبت به خاک ۱، سریعاً پر و بخشی از کادمیوم نیز به صورت رسوب در سطوح ذرات جذب شدند. لذا این نوع جذب به لحاظ فرایندهای شیمیایی جذب واقعی محسوب نمی‌شود. تحت این شرایط شیب نمودار جذبی کاهش و تعداد مکان‌های جذبی ذرات نیز کاهش می‌یابد. چنین رفتار جذب سطحی را می‌توان ناشی از تمایل زیاد رس به جذب Cd در غلظت‌های کم و کاهش این تمایل با افزایش غلظت فلز دانست (اوستان، ۱۳۸۳).



شکل ۳. هم‌دمای‌های جذبی خاک‌های مورد مطالعه



شکل ۴. هم‌دمای جذبی فروندلیچ



شکل ۵. هم‌دمای جذبی لانگمویر

جدول ۵. پارامترهای جذبی فروندلیچ و لانگمویر

معادله خطی							
		b	a	R ²	SE	نمونه خاک	
		۷۳۳۱	۸۵/۹	۰/۹۹۴	۱۲/۵۰	۱	
پارامترهای لانگمویر				پارامترهای فروندلیچ			
K _l	b	R ²	SE	K _f	n	R ²	SE*
۱۱۲۱***	۱/۹۰***	۰/۹۹۲	۲۵/۷۶	۷۶۴/۲***	۱/۷۳***	۰/۹۹۳	۲۵/۱۵
۱۶۲۳***	۲/۳۰**	۰/۹۸۸	۳۱/۵۲	۱۵۰۱/۴***	۱/۴۳***	۰/۹۶۹	۵۱/۴۰

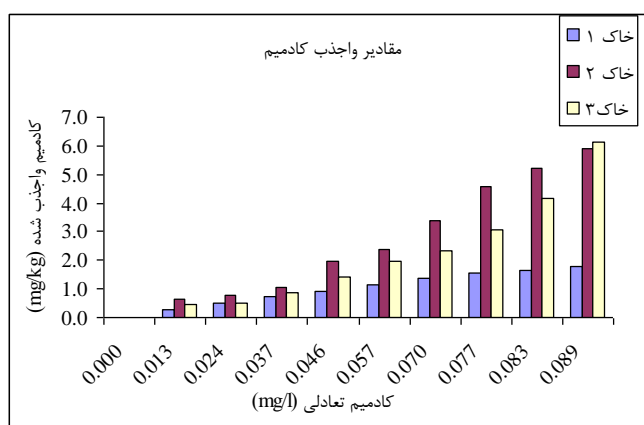
*، معنی دار در سطح $p < 0.05$ ، **، معنی دار در سطح $p < 0.01$ ، ***، معنی دار در سطح $p < 0.001$ ؛ a: عرض از مبدأ نمودار جذبی و b: شیب خطی خاک ۱ است، SE: خطای استاندارد

کادمیوم با شدت ۸۵/۹ جذب شد در حالی که فرایند جذب در خاک ۲ و ۳ معادلات با شیب ملایم (K) جذب شدند. از طرفی ماکزیمم جذب کادمیوم در خاک ۲ و ۳ به ترتیب ۱/۱۲ و ۱/۶۲ گرم در کیلوگرم با شدت جذبی ۱/۹۰ و ۲/۳ تعیین شد. دلیل اصلی افزایش جذب کادمیوم خاک ۱ نسبت به سایر خاک‌ها را می‌توان به وجود درصد بالای رس، CEC و آهک نسبت داد. این روند در سایر خاک‌ها نیز مشاهده شد. به طوری که مقدار و شدت جذب کادمیوم در خاک ۳ نسبت به خاک ۲ بیشتر شد. به عبارت دیگر فاکتورهای جذبی (آهک، رس و pH) کنترل‌کننده میزان و شدت جذبی عناصر سنگین بودند. افزایش مقدار کادمیوم جذب شده در خاک ۳ نسبت به ۲ را می‌توان به زیادی

بر اساس مقادیر ضرایب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) معادلات، داده‌های جذبی نسبت به مدل لانگمویر برازش بهتری را نشان دادند. مکان‌های جذبی برای جذب Cd در مدل لانگمویر یکسان فرض شده‌اند. در صورتی که در مدل فروندلیچ سطح جاذب ناهمگن فرض و برازش داده با درصد کمتری مشاهده شد. همچنین، مقادیر پارامترهای جذبی خاک‌ها (K_l ، b، K_f و n) نسبت به هم تفاوت معنی دار در سطح ۰/۱ درصد از خود نشان دادند ($p < 0.001$). شیب تند و خطی خاک ۱ بیانگر شدت جذب بالاست و به لحاظ ماکزیمم جذب، بیشترین مقدار نسبت به خاک ۲ و ۳ را در غلظت‌های یادشده از خود نشان داد. بدین معنی که به ازای هر کیلوگرم از خاک، ۷/۳۳ گرم

نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقادیر واجذب کادمیوم در خاک‌های ۲ و ۳ تقریباً ۳ برابر مقدار دفعی خاک ۱ است (شکل ۶). این امر به دلیل وجود درصد بالای رس، CEC و زیادی آهک در خاک ۱ بوده و سبب کاهش میزان واجذبی کادمیوم شده است. این فرایند در جذب و فیلترکردن آلاینده‌ها به وسیله ذرات خاک، به‌منزله فاکتور مؤثر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، خاک ۱ از یک طرف موجب افزایش مقدار جذب و از طرف دیگر سبب کاهش مقدار واجذب کادمیوم شده است. لذا خاک ۱ به لحاظ وجود پتانسیل بالا نسبت به افزایش جذب و کاهش واجذب کادمیوم برای استفاده در احداث لاینرهای رسی مناسب تشخیص داده شد. البته به منظور افزایش مقادیر جذبی عناصر سنگین در لاینرهای رسی، انتخاب خاک سنگین بافت شرط اول است و افزایش میزان آهک و سایر جاذب‌ها به خاک، مفید خواهد بود. از این رو بررسی توأم خصوصیات مهندسی و ویژگی‌های جذب و واجذب شیمیایی فلزات سنگین خاک در احداث لاینرهای رسی، سبب افزایش سطح اطمینان در سازه‌های مهندسی خواهد شد.

کربن آلی که منشأ مواد هومیکی است ارتباط داد. دولتی (۱۳۹۳) در بررسی تأثیر مواد هومیکی در شکل‌های شیمیایی Pb و Cd نشان داد که زیادی کربن آلی سبب افزایش جذب مقادیر Pb و Cd در فاز آلی شد. مواد هومیکی علاوه بر تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین، می‌توانند آن‌ها را به صورت قابل دسترس نگهداری کنند، اما شدت جذب و نگهداری عناصر متفاوت از هم هستند (Zalidis and Barbauiarinis, 1999). همچنین، پتانسیل جذب و واجذب عناصر در کانی‌های مختلف، متفاوت و مقدار واجذب عناصر در کانی‌هایی مثل کائولینیت، هالوسیت و آلوفان‌ها نسبت به سایر کانی‌ها بیشتر است (Prashant, 2004). همچنین، محققان نشان دادند که کانی‌های خاک نسبت به فلزات خواص گزینش‌پذیری دارند (McLean and Bledsoe, 1992). لذا بهتر است خصوصیات کانی‌شناسی و ترکیبات ساختاری خاک‌ها به منظور ارزیابی دقیق فرایندهای جذب و واجذب عناصر انجام شود. به منظور برآورد شدت و میزان آلودگی خاک و محیط‌زیست، مطالعه مقدار و شدت واجذب عناصر سنگین



شکل ۶. مقادیر کادمیوم واجذب‌شده

جذبی کادمیوم روی سطوح جذبی خاک‌های موجود در محل دفن زباله ارومیه و ارتباط آن‌ها با خصوصیات مهندسی خاک‌ها ارزیابی شد. معادلات جذبی فروندلیچ و

۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مطالعه بررسی و انتخاب خاک مناسب برای احداث لاینرهای رسی بود. به این منظور پارامترهای

رس به منزله اطلاعات پایه در ارزیابی و انتخاب خاک مناسب برای لاینرهای رسی استفاده شود. همچنین، بهتر است برای بالا بردن پتانسیل جذبی خاک، از جاذب‌های مناسب نیز استفاده شود.

یادداشت‌ها

1. Compacted clay liner
2. Sorption capacity
3. Distribution coefficient
4. Intensity sorption
5. Bonding energy
6. Max-sorption

لانگمویر نسبت به داده‌های جذبی کادمیوم برازش مناسبی از خود نشان دادند. ماکزیمم جذب کادمیوم در خاک ۱، به دلیل زیادی رس، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی و آهک نسبت به سایر خاک‌ها بیشتر بود. از طرف دیگر، مقدار واجذب کادمیوم در خاک ۱ نیز نسبت به سایر خاک‌ها حداقل مقدار بود که به منزله فاکتور مؤثر در ارزیابی لاینرهای رسی است. همچنین، بر اساس ویژگی‌های مکانیکی خاک، ریزدانه بودن، بالابودن دانسیته خشک، پایین بودن رطوبت بهینه و شاخص خمیری بالای ۱۰ درصد، خاک ۱ به منزله گزینه مناسب برای استفاده در لاینر رسی تعیین شد. به منظور افزایش سطح اطمینان توصیه می‌شود از کانی‌شناسی

منابع

- اوستان، ش. ۱۳۸۳. شیمی خاک با نگرش زیست‌محیطی، انتشارات دانشگاه تبریز.
- دولتی، ب. ۱۳۹۳. تأثیر لئوناردیت بر تغییر شکل‌های شیمیایی کادمیوم و سرب در خاک‌های حاصله از مواد مادری متفاوت، مجله دانش آب و خاک، (زیر چاپ).
- فیروزبخت، ب. ۱۳۸۸. بررسی جذب سطحی بر روی مخلوط جاذب‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی گرایش فرایندهای جداسازی و پدیده‌های انتقال، دانشگاه صنعتی شریف.
- طاحونی، ش. ۱۳۷۱. اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد اول- مکانیک خاک، انتشارات مترجم.
- ASTM., D4646-87. 2001. Standard Test Method for 24-h Batch-Type Measurement of Contaminant Sorption by Soils and Sediments. American Society For Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Blakemore, L. C., Searle, P. L. & Daly, B. K. 1981. Methods of Chemical Analysis of Soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10A (Revised), Wellington.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agro Journal*. 54: pp. 464-465.
- Benjamin, M. M., & Leckie, J. O. 1982. Effects of complexation by Cl, SO₄, and S₂O₃ on adsorption behavior of Cd on oxide surfaces. *Environental Science Technology*. 16: pp.162-170.
- Brunner, G., Gerth, J., & Tiller, K. G. 1988. Reaction kinetics of the adsorption and desorption of Ni, Zn and Cd by goethite I. Adsorption and diffusion of metals. *Journal of Soil Science*. 39: pp. 35-52
- Chapman, H. D. 1965. Cation Exchange Capability. In C. A. B. lack et al. (eds) *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of American. Pp. 891-901.
- Czurda, K. A., Wagner, J.-F. 1990. Cation transport and retardation processes in view of the toxic waste deposition problem in clay rocks and clay liner encapsulation. *Engineering Geology*. 30: pp. 103-113
- Environmental Agency. 1990. *Earthworks in Landfill Engineering*. Bristol, BS32 4UD. Part 2: Methods 9.2, 9.5 pp, 16.
- Freundlich H., Hatfield . *Colloid and Capillary Chemistry*. 1928. 3th German edition New York, N. Y.: E. P. Dutton Co. 883p.
- Hendrickson, L. L. & Corey, R. B. 1981. "Effect of equilibrium metal concentration on apparent selectivity coefficients of soil complexes," *Soil Science Society of America*, vol. 131, pp. 163-171.

- Jackson, M. L. 1964. Chemical Composition of Soils. In F. E. Bear (ed.) Chemistry of the soil. 2d Ed. Van Nostrand Rainhold Co. New York, pp. 71-141.
- Jones, R. M. & Murray, E. J., Rix, D. W. & Humphrey, R. D. 2006. Selection of Clays for Use as Landfill Liners. Waste Disposal by Landfill. Vol. 93, pp. 433-438
- Katsuhiko, I. & Yanai, J. 2006. Sorption and desorption properties of Cadmium and Copper on soil clays in relation to charge characteristics. Soil Science and Plant Nutrition. 52: No 1, pp. 5-12.
- Lehmann, R. G. & Harter, R. D. 1984. Assessment of copper-soil bond strength by desorption kinetics, Soil Science Society of America, Vol. 48, pp. 769-772.
- McLean, J. E. & Bledsoe, B. E. 1992. Behavior of Metals in Soils. Ground Water, No: 29, pp. 851-856.
- Namasivayam C, & Yamuna, R. T. 1995. Adsorption of direct red by biogas residual slurry, Environ of Pollut. 89, 1.
- Negro J. R., A., Karlsrud, K., Srithar, S., Ervin, M. C. & Voster, E. 2009. Prediction, monitoring and evaluation of performance of geotechnical structures. By Proceedings of the 17th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, alexandria, egypt, October 5-9. Vol 4, pp. 2930-3005
- Oconnor, G. A. Oconnor, C., & Cline G. R. 1984. Sorption of cadmium by calcareous soils: influence of solution composition, Soil Science Society of American journal. 48: pp.1244-1247.
- Pavel, J., Jana V., Lucie, H., & Vera, P. 2010. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil, a sequential extraction study. Science direct, Geoderma 159: pp. 335-341.
- Prashant, S., Gräfe1, M., Singh, B. & Balasubramanian, M. 2004. Cadmium and Lead desorption from kaolinite. Volume 7. Pp. 205-233.
- Roehle, K. E., & Czurda, K. 1998. Diffusion and solid speciation of Cd and Pb in clay liners, Applied Clay Science, Vol 12, (5), pp. 387-402.
- Tandon, H. L. S. 1998. Methods of Analysis of Soil, Plant, Waters and Fertilizer Development and Consultation Organization, New Delhi, India, pp. 144.
- Zalidis, G., & Barbauiarinis, M. T. 1999. Forms and distribution of heavy metals in soils of the Axios Delta of Northern Greece. Communication in Soil Science and Plant Analysis 30: pp. 817-827.
- Zhou, D., Zhang L., Zhou, J., & Guo, S. 2004. Cellulose/chitin beads for adsorption of heavy metals in aqueous solution. Water Research. 38: pp. 2643-2650.