

یادداشت تحقیقاتی:

حل عددی فرآیند اصلاح الکتروکینتیک برای خاک‌های آلوده به جیوه

مریم پام^۱، غلامرضا اسدالله فردی^{۲*}، احمد خدادادی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران

۲- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تربیت معلم تهران

۳- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی بخش معدن

asadollahfardi@yahoo.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۹/۹]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

چکیده- اصلاح الکتروکینتیک یک تکنولوژی نوید بخش است که می‌توان از آن برای پاکسازی خاک‌های ریزدانه در محل استفاده کرد. در این مطالعه حل عددی فرآیند الکتروکینتیک در خاک آلوده به جیوه مورد توجه قرار گرفته است. مدل عددی برای شبیه سازی انتقال جیوه تحت یک میدان الکتریکی با استفاده از معادله یک بعدی انتقال- انتشار توصیف کننده انتقال آلاینده فرمول بندی شده است. مدل ارائه شده برای نشان دادن تغییر pH و حذف جیوه از خاک رس کائولینیت استفاده می‌شود. برای حل مدل از روش‌های تفاضل محدود استفاده شده است. برنامه کامپیوتری در نرم افزار متلب به دو روش FTCS و Crank-Nicolson نوشته شده که طرح Crank-Nicolson به دلیل دقت بیشتر با نتایج بیشتر منطبق است. برای کالیبراسیون مدل از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. مدل عددی پیشنهاد شده با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی- تصفیه خاک؛ الکتروکینتیک؛ فلز سنگین، جیوه؛ حل عددی

مقدمه

یکی از عمده ترین آلاینده‌های صنعتی، فلزات سنگین است، نزدیک به ۱۶٪ آلاینده‌های خاک را این فلزات تشکیل می دهند. ترکیب‌های مختلف این فلزات به صورت کمپلکس های گوناگون با سایر آلاینده‌های فرار و نیمه فرار، بخش قابل توجهی از آلاینده‌های خاک را در بر می‌گیرد. یکی از این آلاینده‌ها جیوه است، که با توجه به خطرهای بسیار بالای زیست محیطی این ماده، برهم زدن اکوسیستم خاک و احتمال آلوده کردن سفره‌های آب زیرزمینی در شمار مهم ترین آلاینده‌ها است [۱].

فرآیند الکتروکینتیک از یک جریان الکتریکی مستقیم ولتاژ پایین بین الکترودهایی که در خاک آلوده برای ایجاد یک

میدان الکتریکی واقع شده‌اند استفاده می‌کند. به کار بردن جریان در سیستم خاک- آب در شرایط اشباع یا غیر اشباع نتایج زیر را می‌دهد:

(۱) گونه‌های یونی موجود در آب حفره‌ای خاک به سمت الکتروود با بار مخالف حرکت می‌کنند. (۲) ذرات باردار موجود در آب حفره‌ای خاک به سمت الکتروود با بار مخالف حرکت می‌کنند. (۳) توده آب به سمت کاتد حرکت می‌کند (پدیده‌ای که الکترواسمز نامیده می‌شود). (۴) واکنش‌های کنترل‌شده در الکتروودها رخ می‌دهد [۲].

در زمینه حذف آلاینده‌های خاک به وسیله‌ی الکتروکینتیک مطالعات زیادی انجام گرفته است، برخی از مطالعات در زمینه فرآیند الکتروکینتیک به صورت آزمایشگاهی از جمله

توصیف الکترواسمز استفاده می‌شود. در این تئوری سرعت جریان الکترواسمز J_w ($m s^{-1}$) به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲].

$$J_w = -k_{eo}(\nabla E) \quad (۱)$$

k_{eo} ضریب هدایت الکترواسمزی است و مقدار آن تابعی از پتانسیل زتا، ویسکوزیته سیال، تخلخل و هدایت الکتریکی خاک است و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$k_{eo} = \frac{\varepsilon \zeta n}{\tau 2\mu} \quad (۲)$$

که ε ($F m^{-1}$) هدایت الکتریکی بستر، ζ (V) پتانسیل زتا، n تخلخل خاک، τ ضریب تورئوزیته بستر خاک و μ ($N s m^{-2}$) ویسکوزیته سیال است [۱۳].

شار جرمی گونه‌های شیمیایی به وسیله مکانیزم‌های مختلفی ایجاد می‌شود. شار جرمی پخش شونده انتقال جرم به دلیل گرادیان شیمیایی، شار جرمی مهاجرتی، انتقال جرمی گونه‌های باردار تحت یک گرادیان پتانسیل الکتریکی است. علاوه بر این الکترواسمز باعث یک شار جرمی همرفت به دلیل گرادیان‌های الکتریکی می‌شود.

در نتیجه شار جرمی کل را از روابط زیر به دست می‌آوریم:

$$J_i = J_i^d + J_i^{em} + J_i^{eo} \quad (۳)$$

$$J_i^d = D_i^* \nabla(-c_i) \quad (۴)$$

$$J_i^{em} = u_i^* c_i \nabla(E) \quad (۵)$$

$$J_i^{eo} = c_i J_w = c_i k_{eo} \nabla(-E) \quad (۶)$$

که J_i^d ($mol m^{-2} s^{-1}$) شار جرمی پخش گونه شیمیایی i ، D_i^* ($m^2 s^{-1}$) ضریب پخش موثر گونه شیمیایی i ، c_i ($mol m^{-3}$) غلظت گونه شیمیایی i در فاز محلول، J_i^{em} ($mol m^{-2} s^{-1}$) شار جرمی مهاجرت گونه شیمیایی i ، u_i^* ($m^2 V^{-1} s^{-1}$) تحرک یونی موثر گونه شیمیایی i و J_i^{eo} ($mol m^{-2} s^{-1}$) شار جرمی همرفت گونه شیمیایی i است [۱۰، ۱۵، ۱۴].

بیان یک بعدی شار جرمی کل گونه i به صورت زیر است:

$$J_i = -D_i^* \frac{\partial c_i}{\partial x} - c_i(u_i^* + k_{eo}) \frac{\partial E}{\partial x} \quad (۷)$$

حامد و آکار در سال ۱۹۹۱ [۳]، ردی و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۴] و نیز ردی و همکاران در سال ۲۰۱۱ برای حذف پنتا کلرور فنل (PCP)، لپندان و دی نیترو تولوئن (DNT) [۵] اشاره کرد. برخی از مطالعات به صورت مطالعه عددی و مدلسازی فرایند الکتروکیتیک بوده است، از جمله این مطالعات می‌توان به آلاشوبکه و آکار در سال ۱۹۹۲ [۶]، پارک و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۷] و کیم و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۸]، ریبری و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۹] اشاره کرد.

شبیه سازی انتقال جیوه در خاک کاتولینیت تحت میدان الکتریکی با استفاده از معادله یک بعدی انتقال- انتشار، بررسی صحت مدل عددی پیشنهادی از طریق مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی و نیز مطالعه حساسیت از جمله اهداف این مطالعه بوده است.

تئوری

فرضیه‌های زیر در تئوری مورد استفاده، مدلسازی و حل عددی در نظر گرفته شده است:

(۱) بستر خاک ایزوتوپ و اشباع بوده و دارای بار منفی است.
(۲) شرایط ایزوترم (هم دمایی) حاکم است و اثر دما لحاظ نشده است. (۳) همه شارها توابع همگن خطی از همه نیروهای به دست آمده است. (۴) الکتروفورز موجود نیست. (۵) ذرات خاک غیرهادی الکتریکی است. (۶) انحلال الکتروود در نظر نیست. (۷) هدایت سطحی و پتانسیل جریان ناچیز است. (۸) فعل وانفعالات شیمیایی لحظه‌ای و به صورت تعادل در نظر گرفته شده و به عبارت دیگر از سینتیک چشم‌پوشی شده است.

اعمال گرادیان‌های الکتریکی و شیمیایی بر سیستم خاک- آب-آلاینده، انتقال ماده و انرژی را از طریق شارهای حاصل از سیال و جرم در راستای بستر خاک آغاز می‌کند [۱۰، ۱۱]. شار سیال از به کار بردن یک گرادیان الکتریکی حاصل می‌شود. تئوری هلمهولتز اسمولوفسکی بیشتر برای

ضرایب پخش و تحرک یونی گونه‌های در نظر در این مدل‌سازی در جدول (۱) آمده‌اند. این مقادیر در رقت بی‌نهایت محاسبه شده‌اند [۱۷].

معادلات دیفرانسیل جزئی توصیف کننده انتقال جرم، معادلات مقدار اولیه-مرزی است و یک شرط اولیه و دو شرط مرزی برای هر معادله دیفرانسیل انتقال موجود مورد نیاز است. برای حل یک بعدی معادله انتقال ۴ گونه شیمیایی، ۴ شرط اولیه و ۸ شرط مرزی مورد نیاز خواهد بود. با اعمال شرط الکترون خنثایی در سیستم یکی از معادلات دیفرانسیل جزئی ناپدید خواهد شد. بنابراین ۳ شرط اولیه و ۶ شرط مرزی مورد نیاز خواهد بود. شرایط اولیه و مرزی مورد نیاز در جدول (۲) خلاصه شده است.

پارک و همکاران شارهای تولید یون هیدروژن در آند و هیدروکسید در کاتد را به وسیله روابط زیر بیان کرده‌اند:

$$J_{H^+} = \frac{n_{H^+} I_{H^+}}{F} \quad (13)$$

$$J_{OH^-} = \frac{n_{OH^-} I_{OH^-}}{F} \quad (14)$$

که n_i بارده الکتروند برای گونه شیمیایی i و I جریان به کار رفته در سلول است [۷].

آنها همچنین نشان دادند که غلظت H^+ در آند را می‌توان از طریق عبارت زیر به دست آورد:

$$C_H = 2K_w \left[-\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} + \left(\left(\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} \right)^2 + 4K_w \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (15)$$

که در آن A سطح مقطع عرضی سلول، Δt گام زمانی مابین نقطه جدید و یک نقطه قدیمی، $V_{reservoir}$ حجم هر مخزن و K_w ثابت تعادل آب است. چون این پدیده یونیزاسیون تحت شرایط تعادل رخ می‌دهد بنابراین داریم:

PDE^1 (معادله دیفرانسیل جزئی) توصیف کننده انتقال جرم گذرای گونه‌های i با استفاده از قانون بقای جرم بیان می‌شود.

$$n \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla J_i + nR_i \quad (8)$$

R_i میزان تولید خالص گونه‌های i به دلیل جذب را بیان می‌کند [۱۶].

$$R_i = -\frac{\rho}{n} \frac{\partial q_i}{\partial c_i} \frac{\partial c_i}{\partial t} \quad (9)$$

که ρ چگالی حجمی خشک و q_i غلظت جذب شده گونه‌های i در واحد جرم خاک است. توزیع غلظت‌های جذب شده به وسیله‌ی رابطه زیر به تغییرات غلظت محلول مرتبط می‌شود:

$$\frac{\partial q_i}{\partial c_i} = K_i^d \quad (10)$$

K_i^d ($m^3 kg^{-1}$) ضریب توزیع و R_i^d ضریب تاخیر گونه i است [۱۴، ۱۰، ۷].

$$R_i^d = 1 + \frac{\rho K_i^d}{n} \quad (11)$$

معادلات دیفرانسیل جزئی توصیف کننده انتقال گونه‌های شیمیایی را می‌توان از ترکیب معادلات شار جرمی کل و معادله بقای جرم به دست آورد:

$$n \frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i^* \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + (u_i^* + k_{eo}) \frac{\partial E}{\partial x} \frac{\partial c_i}{\partial x} + nR_i \quad (12)$$

برای توصیف انتقال ۴ گونه شیمیایی در سیال منفذی خاک چهار معادله دیفرانسیل استفاده می‌شود. این یونها Hg^{+2} ، به دلیل اینکه گونه آلاینده است، Cl^- ، به دلیل اینکه جیوه به صورت کلرید جیوه در آزمایش استفاده شده است، H^+ و OH^- چون در توصیف پخش اسید و باز که روی شیمی سیال منفذی اثر مهمی دارند، مد نظر قرار می‌گیرند.

جدول ۱: ضریب پخش و تحرک گونه‌ها

گونه شیمیایی	ضریب پخش (m^2/s)	تحرک یونی ($m^2/V s$)	گونه شیمیایی	ضریب پخش (m^2/s)	تحرک یونی ($m^2/V s$)
DOH^-	5.27×10^{-9}	$-2/06 \times 10^{-7}$	$D_{Hg^{+2}}$	$7/05 \times 10^{-11}$	$5/44 \times 10^{-8}$
D_{Cl^-}	$2/03 \times 10^{-9}$	$-7/9 \times 10^{-8}$	D_{H^+}	$9/31 \times 10^{-9}$	$3/625 \times 10^{-7}$

جدول ۲: شرایط اولیه و مرزی

C_{OH}	C_H	C_{Hg}	گونه شیمیایی
$1 \times 10^{-7} M$	$1 \times 10^{-7} M$	mg/kg 800	شرط اولیه
$C_{OH} = \frac{10^{-14}}{C_H}$	$C_H = \frac{1}{2} \left[-\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} + \left(\left(\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} \right)^2 + 4K_w \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	$J_{Hg} = C_{Hg} J_w$	شرط مرزی در $x=0$
$C_{OH} = \frac{10^{-14}}{C_H}$	$C_H = 2K_w \left[-\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} + \left(\left(\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} \right)^2 + 4K_w \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1}$	$J_{Hg} = 0$	شرط مرزی در $x=l$

مکان) و طرح Crank-Nicolson به صورت عددی حل می‌شود. برای حل عددی به هر دو روش برنامه کامپیوتری در نرم افزار متلب نوشته شده است. برنامه کامپیوتری برای شبیه سازی انتقال جیوه و تغییرات pH در خاک طی فرآیند الکتروکیتیک نوشته شده است. هدف از این مدل سازی شبیه سازی فرآیند الکتروکیتیک در حالت کلی نبوده است بلکه بررسی یک سیستم ویژه‌ای از فرآیند الکتروکیتیک برای انتقال جیوه در خاک رس کائولینیت در مقیاس آزمایشگاهی است. سپس نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. برای این منظور از یک سری فرضیات ساده سازی استفاده می‌شود که روند حل مساله را تسهیل می‌کند. جدول (۳) پارامترهای استفاده شده در مدل عددی را خلاصه می‌کند.

جدول ۳: پارامترهای مورد استفاده در حل عددی

۰/۵	اندازه گام مکانی (cm)	۴	تعداد گونه ها
۱	اندازه گام زمانی (s)	۱۲	طول نمونه خاک (cm)

$$C_H + C_{OH^-} = K_w \quad (16)$$

و سرعت واکنش‌های H^+ و OH^- برابر هستند، غلظت H^+ در کاتد را می‌توان با جاگذاری دو معادله بالا در یکدیگر به راحتی به دست آورد [۷].

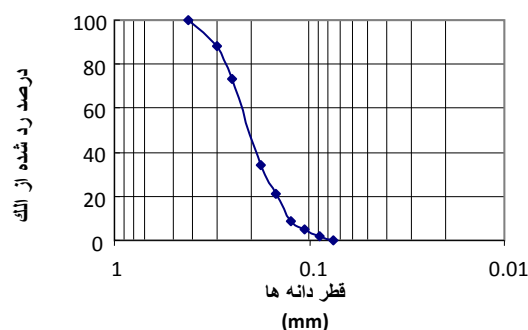
$$C_H = \frac{1}{2} \left[-\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} + \left(\left(\frac{I A \Delta t}{F V_{rese}} \right)^2 + 4K_w \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (17)$$

مدلسازی

انتقال سیال و آلاینده از داخل خاک رس کائولینیت تحت میدان‌های الکتریکی از طریق روش تفاضل محدود مدل شده است. معادلات ایجاد شده با استفاده از طرح $FTCS^2$ (تفاضل پیشرو نسبت به زمان و تفاضل مرکزی نسبت به

نتایج آزمایشگاهی

برای بررسی صحت مدلسازی از نتایج آزمایشگاهی گیاهی [۱۸] استفاده شده است. خاک مورد استفاده در این آزمایش یک نوع خاک رس کائولینیت بوده است که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۴) نشان داده شده است. منحنی دانه بندی مخلوط رس و ماسه استفاده شده در آزمایش‌ها در شکل (۱) آمده است. بر اساس سیستم طبقه بندی متحد^۳، رس مورد استفاده از نوع غیر آلی با حد خمیری زیاد (CH)، است [۱۸].



شکل ۱: منحنی دانه بندی ماسه

آلاینده خاک مورد استفاده کلرید جیوه ($HgCl_2$) بوده است. پودر خالص این ماده در آب مقطر حل شده و با غلظت ۸۰۰ میلی گرم جیوه در کیلوگرم خشک خاک، به خاک افزوده شده است.

جدول ۴: مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک کائولینیت مورد استفاده در آزمایش

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	۱/۶۲	نوع خاک	CH
pH خاک	۷	حد روانی (%)	۶۵
تخلخل	-۰/۵ ۰/۴۵	حد خمیری (%)	۱۸

پایلوت مورد استفاده در آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. پایلوت به شکل یک مکعب مستطیل با مقطع داخلی ۴×۴ سانتی متر و طول کل $۲۶/۴$ سانتی متر است [۱۸].

هدف از این آزمایش‌ها بررسی میزان حذف جیوه به وسیله فرآیند الکتروکیتیک و اعمال شرایطی بوده است که در آن بیشینه حذف صورت گیرد. آزمایش‌ها به وسیله گرادیان ولتاژ ۱ ولت بر سانتی متر در حالات مختلف انجام می شود. یکی از حالاتی که بررسی حذف جیوه در آن انجام شده استفاده از آب به عنوان محلول آنولیت و کاتولیت است. آزمایش الکتروکیتیک در این حالت به مدت ۳۲ روز انجام شده است و در روز آخر با اندازه گیری غلظت جیوه و pH خاک در نمونه مورد آزمایش راندمان حذف ارزیابی می شود [۱۸].

نتیجه گیری

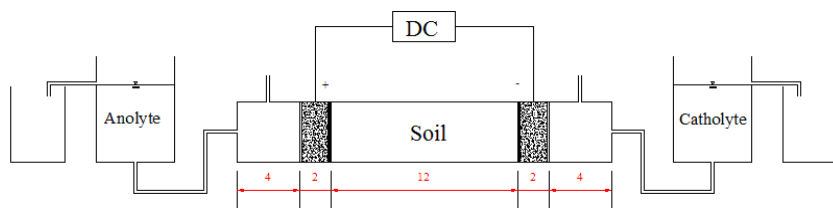
یکی از محدودیت‌ها این مدلسازی کمبود داده‌های پایلوتی بوده که با داده‌های موجود و در دسترس، مدل صحت سنجی شده و محدودیت بعدی عدم توانایی مدل در تاثیر واکنش‌های شیمیایی که در طی فرایند الکتروکیتیک برای حذف جیوه رخ می دهد است. به عبارت دیگر غلظت‌های به دست آمده برای جیوه از آزمایش و حل عددی تنها غلظت در فاز محلول بوده و غلظت جیوه جذب شده و ته نشین شده را شامل نمی شود.

بررسی مدل با حل تحلیلی

به منظور بررسی صحت مدل پیشنهادی، نتایج شبیه سازی با حل عددی معادله انتقال آلاینده مقایسه می شود، معادله انتقال یک بعدی آلاینده به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{hd} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + Ri \quad (18)$$

که v_x سرعت نفوذ متوسط، D_{hd} پخش هیدرودینامیک و Ri ضریب جذب و واجذب است. حل تحلیلی معادله



شکل ۲: پیلوت آزمایشگاهی

پارامترهای خاک و ثابت‌های مورد استفاده در مدل‌سازی عددی در جدول ۵ آورده شده‌اند. ضریب تورتوزیته خاک کائولینیت، از طریق آزمایش تعیین نشده است ولی مقدار ۰/۴ در این مطالعه استفاده شده است.

جدول ۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

پارامتر	مقدار
تخلخل	۰/۵
ضریب تورتوزیته	۰/۴
اولیه خاک pH	۷
هدایت الکتریکی ($\text{CV}^{-1}\text{m}^{-1}$)	7×10^{-10}
ویسکوزیته سیال (C V s m^{-3})	۰/۰۰۱
غلظت اولیه جیوه (g/kg)	۸۰۰
گرادیان پتانسیل الکتریکی (V cm^{-1})	۱

پیش‌بینی‌های عددی

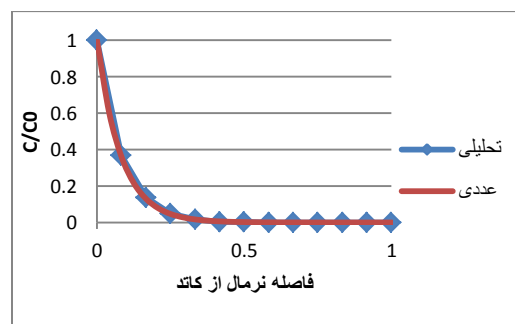
pH خاک

در شکل (۴) پیش‌بینی انجام شده به وسیله‌ی مدل عددی برای تغییرات pH نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است pH خاک در نزدیکی آند ($x=1$) اسیدی و در نزدیکی کاتد ($x=0$) بازی است. پیش‌بینی عددی در این مورد با نتایج آزمایشگاهی موجود مطابقت نشان می‌دهد.

(۱۸) برای یک منبع ثابت در یک بعد از رابطه زیر در شرایط اینکه $Ri=0$ فرض شود به دست می‌آید.

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v_x t}{2\sqrt{D_{hd}t}} \right) + \exp \left(\frac{v_x x}{D_{hd}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + v_x t}{2\sqrt{D_{hd}t}} \right) \right] \quad (19)$$

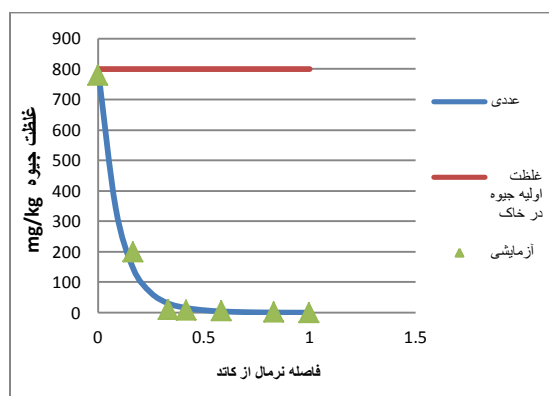
شرط اولیه مورد استفاده برای حل تحلیلی گفته شده در بالا $C(x, t=0)=0$ و شرایط مرزی مورد استفاده $C(x=0, t)=1$ و $C(x=\infty, t)=0$ است. برای بررسی صحت مدل پیشنهادی فرض می‌شود که شرایط اولیه و مرزی مانند حل تحلیلی باشند به جز در $x=l$ که به صورت $C(x=l, t)=0$ به کار می‌رود [۱۹].



شکل ۳: مقایسه حل عددی با حل تحلیلی

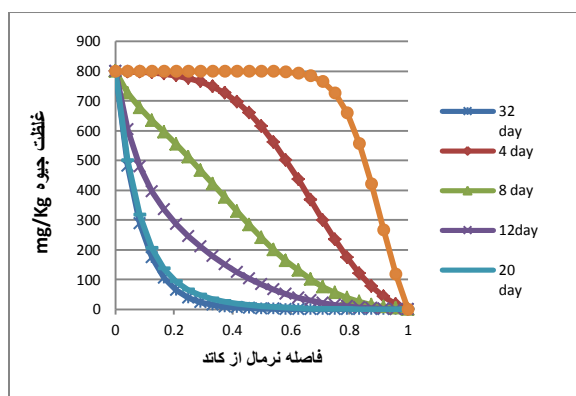
شکل ۳ مقایسه حل عددی با حل تحلیلی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود حل عددی معادله انتقال از طریق تفاضل محدود مطابقت خوبی با حل تحلیلی نشان می‌دهد.

آزمایشگاهی، می‌توان به این نتیجه رسید که بین نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی مطابقت خوبی وجود دارد.



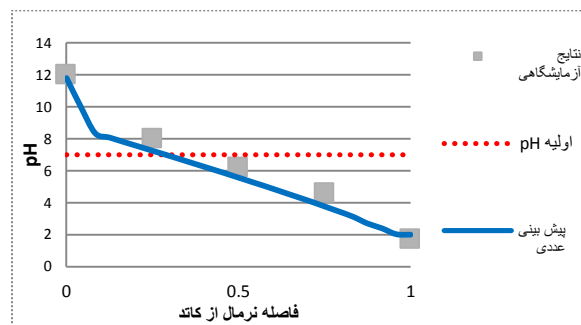
شکل ۶: پیش بینی عددی تغییرات غلظت جیوه در انتهای آزمایش

بنابراین با توجه به صحت مدلسازی پیش بینی می‌شود که روند حذف در روزهای چهارم و هشتم و دوازدهم و بیستم به صورت شکل (۷) باشد.



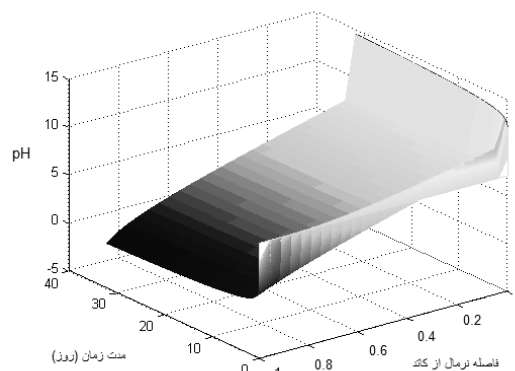
شکل ۷: پیش بینی عددی حذف جیوه در روزهای مختلف

شکل (۸) روند حذف فلز جیوه از خاک رس کائولینیت را به وسیله‌ی مدلسازی عددی نسبت به زمان و مکان نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود با گذشت زمان درصد حذف جیوه در اطراف آند افزایش می‌یابد و با پیشرفت به سمت کاتد، جذب کاتد شده و دفع می‌شود. بنابراین نمودار به دست آمده از مدلسازی عددی به خوبی با تئوری و نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. این نتایج با



شکل ۸: تغییرات pH خاک بعد از پایان آزمایش

در شکل (۵) تغییرات pH خاک در طی فرآیند الکتروکیتیک نسبت به زمان و مکان نمایش داده شده است. در کل نمونه خاک از آند به کاتد، pH خاک کائولینیت مورد آزمایش در حال افزایش است و مشاهده می‌شود که این روند در کلیه زمان‌ها برقرار است.

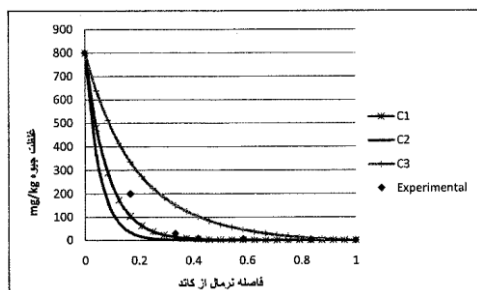


شکل ۹: تغییرات pH خاک نسبت به زمان و مکان

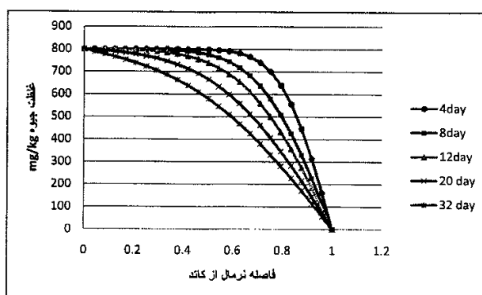
حذف جیوه

نمودار تغییرات غلظت جیوه به دست آمده از مدلسازی عددی در روز آخر در نمونه خاک مورد آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است. در شکل (۶) تغییرات غلظت جیوه به دست آمده از مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. همان‌گونه که از هر دو نمودار مشخص است، جیوه به دلیل دارا بودن بار مثبت به تدریج از آند حذف شده و به سمت کاتد رفته و از آنجا دفع می‌شود. که با توجه به نمودارهای حاصل از مدلسازی عددی و نتایج

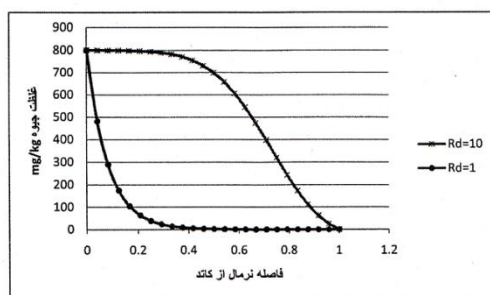
پژوهش‌های انجام شده به وسیله‌ی پارک و همکاران در سال ۲۰۰۳ در این خصوص مطابقت دارد [۷].



شکل ۹: بررسی حساسیت مدل به گرادیان ولتاژ



شکل ۱۰: نتایج مدل‌سازی تنها با حضور مکانیزم پخش

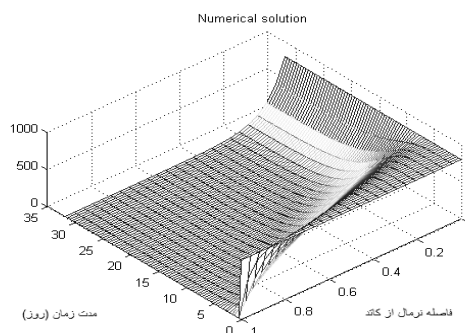


شکل ۱۱: نتایج تحلیل حساسیت به ازای ضرایب تاخیر متفاوت

جمع بندی:

نکات کلیدی به دست آمده از این مطالعه را می‌توان مطابق زیر خلاصه کرد.

- ۱- مدل به دست آمده از این مطالعه تغییرات pH و غلظت جیوه در خاک کاتولینیت را با اطمینان قابل قبول پیش بینی می‌نموده و با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد.
- ۲- نتایج مدل‌سازی نشان داد که سازوکار مهاجرت و الکترواسمز در فرایند حذف جیوه نقش اصلی را دارند.
- ۳- افزایش گرادیان ولتاژ باعث افزایش روند حذف در مدل سازی می‌شود.
- ۴- افزایش ضریب تاخیر به مقدار ۱۰ به دلیل افزایش میزان جذب سطحی آلاینده جیوه به وسیله‌ی ذرات خاک، حذف



شکل ۸: تغییرات غلظت جیوه نسبت به مکان و زمان

حساسیت مدل

نتایج به دست آمده از حساسیت مدل نسبت به افزایش گرادیان ولتاژ در مدل سازی سبب افزایش حذف جیوه شده و علت آن ممکن است افزایش جریان الکترواسمز و مهاجرت الکتریکی باشد. منحنی C1، C2، C3 به ترتیب غلظت جیوه در روز آخر با گرادیان ولتاژ ۱، ۱/۵ و ۰/۵ ولت بر سانی متر را نشان می‌دهند (شکل ۹). حساسیت مکانیزم پخش در مدل سازی مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که در حذف جیوه از خاک مکانیزم پخش نقش اصلی را ندارد (شکل ۱۰). حساسیت مدل نسبت به ضریب تاخیر در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این ضریب از طریق ایزوترم جذب سطحی در مدل‌سازی فرایند وارد می‌شود. افزایش جذب سطحی باعث افزایش ضریب تاخیر و در نتیجه سبب کاهش در سرعت حذف گونه آلاینده خواهد شد. شکل (۱۱) غلظت جیوه در روز آخر را به ازای ضریب تاخیر ۱ و ۱۰ نشان می‌دهد. همچنان که در شکل دیده می‌شود ضریب تاخیر برابر یک با نتایج مطابقت بیشتری داشته و افزایش ضریب تاخیر باعث کاهش روند حذف جیوه می‌شود.

model", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 3, pp. 186-196.

13. Eykholt, G. R., 1992. "Driving and complicating features of the electrokinetic treatment of contaminated soils", PhD thesis, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Texas at Austin, Tex.

14. Ahmad, H., (2005), "Evaluation and enhancement of electrokinetic technology for remediation of Chromium Copper Arsenic from clayey soil", PhD thesis, Dept. of Civil and environmental Eng., at Florida state university.

15. Alshawabkeh, A. N., Yeung, A. T., Bricka, M. R., (1999). "practical aspects of in-situ electrokinetic extraction", *Environmental Engineering*, vol. 125, No. 1, pp. 27-35.

16. Alshawabkeh, A. N., (1994), "Theoretical and Experimental Modeling of Removing Contaminants from Soils by an Electric Field", Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The Louisiana State University.

17. Lee, H. H., and Yang, J. W., 2000. "A New Method to Control Electrolytes pH by Circulation System in Electrokinetic Soil Remediation", *Journal of Hazardous Material*, B77, pp. 277-240.

۱۸. کیایی، آ.، ۱۳۸۵. "پالایش خاکهای آلوده به جیوه

به روش الکتروکیتیک پیشرفته"، پایان نامه کارشناسی

ارشد، مهندسی عمران-محیط زیست، دانشکده عمران،

دانشگاه تربیت مدرس

19. Al-Hamdan, A. Z., Reddy, K. R., (2008). "Electrokinetic remediation modeling incorporating geochemical effects", *Environmental Engineering*, vol. 134, No. 1, pp. 91-105.

جیوه را به شدت کاهش می‌دهد؛ بنابراین برای افزایش راندمان حذف بهتر است میزان ضریب تاخیر را به حداقل رساند.

مراجع:

1. EPA, 1997. "Recent Development for In-Situ Treatment of Metal Contaminated Soils.
2. Hunter, R.J. 1981. "Zeta Potential in Colloid Science". Academic Press. London.
3. Hamed, J., and Acar, Y. B., 1991. "Pb (II) Removal from Kaolinite by Electrokinetics" *J. Geotech. Eng.*, Vol. 117, No. 2, pp. 241-271.
4. Reddy, K. R., Chaparro, C., and Saichek, R. E., 2003. "Iodide-Enhanced Electrokinetic Remediation of Mercury-Contaminated Soils", *Journal of Environmental Engineering*, 129(12), pp1137-1148.
5. Reddy K.R. Darko-Kagya K. and AL.Hamdan A. 2011 Electrokinetic remediation of chlorinated aromatic and nitroaromatic organic contaminant in clay soil, *Environmental engineering science*, 28(6), pp405-413.
6. Alshawabkeh, A. N., Acar, Y. B., (1992), "Removal of contaminants from soils by electrokinetics: A theoretical treatise", *Environmental science and health*, A 27, pp. 1835-1861
7. Park J.S., Kim S.O., Kim K. W., Kim B. R., Moon S.H., (2003) "Numerical analysis for electrokinetic soil processing enhanced by chemical conditioning of the electrode reservoirs", *Journal of Hazardous Materials*, B99, pp.71-88.
8. Kim, S. O., Kim, J. J., Kim, K. W., Yun, S. T., 2003. "models and Experiments on electrokinetic removal of Pb (II) from kaolinite clay", *Separation science and technology*, vol. 39, No. 8, pp. 1927-195.
9. Ribeiro A.b. Rodrigues-Maroto J.M. Mateus E.P. and Gomes H. 2005 Removal of organic contaminants from soils by an electrokinetic process : the case of atrazine experimental and modeling, *Chemosphere* ,59pp,1229-1239
10. Kim, S. O., Kim, J. J., Yun, S. T., Kim, K. W., (2003), " Numerical an experimental studies on Cadmium (II) transport in kaolinite clay under electrical fields", *water, air and soil pollution*, vol. 150, pp. 135-162.
11. Alshavabkeh, A. N., (2001), "Basics and application of electrokinetic remediation", handouts prepared for a short course, federal university of Rio de Janerio.
12. Alshawabkeh, A. N. and Acar, Y. B., (1996), " Electrokinetic remediation II: Theoretical

