

# نقش مواد تشکیل دهنده خاک در نفوذ پذیری و انتقال سرب و روی

احمد خدادادی<sup>۱\*</sup>، ادلفو فوریورو<sup>۲</sup>

۱- استادیار محیط زیست، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه لاول، کبک، کانادا

\*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

Akdarban@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۱، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۲)

**چکیده** - مواد شیمیایی تشکیل دهنده، خاک اثر قابل ملاحظه‌ای بر تراکم و نفوذپذیری آن - به دلیل نحوه فرار گرفتن ذرات خاک و بهسازی شیمیایی آن - می‌تواند داشته باشد. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی خاک طبیعی، کائولینیت به عنوان یک رس ساده با در صد‌های مختلف با کربنات کلسیم (سنگ آهک) و سیلیکا ژل (اکسید سیلیس آمورف) ترکیب و سپس مطابق استاندارد با رطوبت بهینه، متراکم شد. بعد از تراکم خاک از ستون متراکم شده آب مقطر و محلول سرب و روی و کلرورسدیم در فشار و درجه حرارت ثابت عبور داده شد. سپس تراکم و نفوذپذیری خاک در حالت‌های مختلف تعیین شده است. آزمایشها نشان می‌دهد که مواد تشکیل‌دهنده خاک و فعل و انفعالات شیمیایی بین آب و خاک می‌تواند تأثیرهای مهمی بر خواص ژئوزیست - محیطی خاک داشته باشد. در این گزارش، بر نقش سطح مخصوص خاک، ظرفیت جابه‌جایی یونی، pH و مقدار مواد آمورف موجود در خاک و اثر آنها بر کیفیت خاک - از نظر تراکم پذیری و جذب مواد شیمیایی - تأکید و نشان داده شده است که مواد افزودنی نظیر سیلیکا ژل - که خاصیت پوزولانی دارد - تا دو برابر، نفوذ پذیری خاک را کاهش می‌دهد و قدرت جذب فلزهای سنگین را افزایش می‌بخشد. کربنات کلسیم نیز موجب افزایش pH خاک و افزایش جذب آلودگیها می‌شود. فعل و انفعالات شیمیایی بین خاک و آلودگی، از طریق مدل ترکیبی انتقال و ژئوشیمی شبیه‌سازی شده است

**کلید واژگان:** خاک، سنگ آهک، سیلیکا آمورف، تراکم، نفوذپذیری، مدل‌های ژئوشیمی.

## ۱- مقدمه

آمارهای موجود، سالیانه حدود ۳۸ هزارتن زباله شهری و چندین برابر آن زایندهات کارخانجات و معادن کشور و بیش از ۱/۵ میلیارد مترمکعب پساب کارخانجات و کشاورزی آب و خاک وارد می‌شود (ابراهیم زاده [۱] عصایان [۲] رجیبی [۳] باقری [۴]). فلزهای سمی از جمله مواد آلوده کننده خاک است که تجزیه بیولوژیک

دفع مقدار زیادی از زباله‌های شهری، ورود فاضلاب کارخانه‌ها و استفاده بی رویه از مواد شیمیایی و سموم دفع آفات در کشاورزی، موجب آلودگی خاک می‌شود که با انتقال آنها به فاز آبی، میزان آلودگی آب های زیر زمینی و سطحی، سیر صعودی را طی می‌کند. برطبق

در اجرای پروژه‌های ژئو تکنیکی و ژئوزیست محیطی ایجاد می‌کنند.

شناخت فیزیک و شیمی خاک و فعل و انفعالات شیمیایی بین آب و خاک تا حد زیادی می‌تواند در طراحی پروژه‌های ژئو زیست محیطی مانند محل دفن زباله کمک کند. اهمیت شیمی خاک در تراکم و نفوذپذیری و جذب مواد آلاینده مانند مواد آلی سمی و فلزهای سنگین و مواد زاید رادیواکتیو - توسط خاک رس، اخیراً مورد توجه قرار گرفته و بر نقش سطح مخصوص خاک، ظرفیت جابه‌جایی یونی، pH و مقدار مواد ارگانیک و آمورف موجود در خاک و اثر آنها بر کیفیت خاک از نظر تراکم پذیری، مقاومت و جذب مواد شیمیایی تأکید شده است [۷]. در تحقیق حاضر، امکان کاهش میزان نفوذپذیری و افزایش جذب فلزهای سمی با افزایش مواد افزودنی به خاک، بررسی و نشان داده شده است که شناسایی مواد تشکیل‌دهنده خاک و فعل و انفعالات فیزیک و شیمی بین آب و خاک و مواد آلاینده آنها، می‌تواند در ارزیابی بهبود کیفیت خاک برای پروژه‌های زیست محیطی مؤثر باشد.

## ۲- مواد و روش آزمایش

خاک طبیعی از ترکیباتی نظیر رس، آهک، مواد آمورف و بعضی کربنات‌ها تشکیل شده است. در این تحقیق، از ساده ترین نوع خاک یعنی کائولینیت - که در واقع یک خاک ساده با سطح مخصوص؛ جابه‌جایی یونی<sup>۱</sup> و pH پایین است - و با ترکیب کردن آن با سنگ آهک، سیلیکا ژل با درصدهای وزنی مختلف استفاده شده است. به منظور ایجاد دانه بندی یکنواخت، خاک مورد نظر سرنده شده و مواد عبوری از الک شماره ۲۰۰ مش برای آزمایش استفاده شده است. خاک ساده و ترکیبات مختلف آن در

آنها میسر نیست. خاک، منبع غذا و آب نیز محیط طبیعی زیست بسیاری از موجودات زنده و مأمون و محل زندگی بسیاری از تولیدکنندگان اولیه هرم غذایی است. از طرف دیگر با توجه به رشد صنایع، ترافیک و ایجاد آلودگیهای سمی در هوا - بویژه ذرات معلق - بر اثر باران و برف مجدداً به زمین بازگشته و بر اثر شستشو و بارندگی به آب وارد می‌شوند. یکی از راههای جلوگیری از انتقال آلودگیها به آب های سطحی و زیرزمینی، دفن زباله‌های شهری و صنعتی و اتمی با استفاده از لایه های خاک رس متراکم است [۵].

روشهای جدید و متعددی برای افزایش کیفیت خاک - به منظور پایین آوردن میزان نفوذپذیری خاک یا افزایش میزان جذب آلودگیها توسط خاک - پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به تقویت زمین با به‌کارگیری مواد ژئوسینتتیک یا اصلاح به روشهای تراکم، زهکشی و تزریق مواد اشاره کرد. با وجود توسعه تکنولوژی، امکان تقویت خاک و افزایش کیفیت خاک برای پروژه‌های ژئوزیست محیطی در محل محدود است. روشهای گوناگونی برای افزایش کیفیت خاک در محل نظیر روش فیزیکی، مکانیکی، روش تثبیت شیمیایی و بیولوژیکی با توجه به وضعیت محل تعیین می‌شود. لیکن کاربرد روشهای فیزیکی و مکانیکی محدود است [۶]. بسیاری از خاکها به علت دارا بودن مشخصات نامطلوب فنی، برای اجرا یا توسعه بیشتر پروژه‌های ژئوتکنیکی نظیر هسته سدها، دیوارهای حائل، زیرسازی راه و راه آهن یا اجرای پروژه‌های ژئوزیست محیطی، نظیر دفن مواد زاید شهری، بهداشتی و اتمی مناسب نیستند. اینگونه خاکها بدلیل حساسیت و ناپایداری در برابر رطوبت، مقاومت کم از خود نشان داده، از تراکم پذیری مناسب برخوردار نبوده و نفوذپذیری بیش از نیاز در طرح را دارند. لذا مشکلات فراوانی را از نظر فنی و اقتصادی

پس از اشباع سازی خاک با کاتیون شاخص، نمکهای اضافی آن با یک محلول رقیق حذف شده و سپس جابه‌جاییهای کاتیون شاخص با یک کاتیون دیگر انجام می‌شود سپس مقدار کاتیون شاخص جابه‌جا شده اندازه‌گیری و CEC خاک محاسبه می‌شود. در مورد اندازه‌گیری pH خاک، از روش استاندارد خاک و آب مقطر به نسبت ۱ به ۲ در یک لوله آزمایش ۲۰ سانتی متر مکعب حداقل به مدت ۸ ساعت تکان داده شده سپس سانتریفوژ و صاف می‌شود. pH محلول زلال به وسیله pH/ISE<sup>۲</sup> تعیین شد. نتایج به دست آمده برای خواص فیزیکی و شیمیایی این خاک در جدول ۱ نشان داده شده است.

همانطور که جدول ۱ نشان می‌دهد، افزایش مواد کربناتی به مقدار زیادی pH حاصل از خاک را افزایش می‌دهد. افزایش pH خاک موجب ازدیاد تحمل خاک در مقابل ترکیبات اسیدی گردیده و در نتیجه مقاومت خاک در مقابل فرسایش افزایش می‌یابد. علاوه بر این به دلیل افزوده شدن کربناتهای قلیایی، به ظرفیت جابه‌جایی کاتیونی خاک اضافه می‌شود. از سوی دیگر همانطور که در جدول مشخص شده، افزایش مواد پوزولانی یا مواد آمورف نظیر سیلیکا ژل، موجب افزایش جابه‌جایی یونی و سطح مخصوص خاک ترکیبی شده است. افزایش سطح مخصوص خاک، موجب تحکیم بیشتر خاک شده و مقدار رطوبت خاک و جذب مواد سمی بیشتر می‌شود.

آزمایشهای سطح مخصوص<sup>۱</sup> ظرفیت جابه‌جایی کاتیونی قرار گرفت.

سطح ویژه معمولاً از طریق آزمایش BET (جذب سطحی N<sub>2</sub> در دمای کم) یا از طریق اندازه‌گیری سطح ویژه با جذب سطحی مایعات قطبی از جمله به‌وسیله اتیلن گلیکل منواتیل<sup>۲</sup> تعیین می‌شود [۷]. در این تحقیق از روش اتیلن گلیکل منواتیل برای اندازه‌گیری سطح ویژه استفاده شده و نتایج آن در جدول ۱ آمده است. برای تعیین CEC روشهای مختلفی وجود دارد که در چهار گروه زیر خلاصه می‌شوند:

- روش سر جمع، اندازه‌گیری و جمع کاتیونهای تعویض پذیر جابه‌جا شده، یعنی یونهای قابل تعویض نظیر Na<sup>+</sup> Ca<sup>+</sup> Mg<sup>+</sup> K<sup>+</sup> (H<sup>+</sup> Al<sup>+</sup>) اسیدپته قابل تعویض

- روش جابه‌جایی مستقیم کاتیون شاخص اشباع شده، روش جابه‌جایی کاتیون شاخص اشباع بعد از شستشو و آزادسازی نمک اشباع.

- پیگیری و اندازه‌گیری کاتیونهای شاخص رادیواکتیو نظیر Ca<sup>2+</sup> و Ba<sup>2+</sup>

اندازه‌گیری CEC در اغلب روشها بر پایه اشباع با آمونیم به عنوان کاتیون شاخص استوار است. اما برای برخی از کانیها این روشها نتایج دست پایین و اندکی را به دست می‌دهند [۸]. مثلاً برای کانیهای رسی ۱:۱ (کائولینیت و هالوزیت) آمونیم نمی‌تواند کاملاً به جای Al<sup>+</sup> و H<sup>+</sup> جانشین شود و برای کانیهای ۲:۲ (ورمیکولیت، میکا و ایلیت) یون شاخص آمونیم ثابت شده و قابل تعویض نیست. در این مورد سدیم و باریم توصیه می‌شود. زیرا آنها می‌توانند بهتر تبادل شده و تعیین شوند. کاربرد یون دو ظرفیتی باریم به عنوان کاتیون محلول مؤثرتر است از اینکه از یونهای تک ظرفیتی استفاده شود.

1. SSA

2. EGME

3. Beckman pH Meter Type

جدول ۱ خواص فیزیکی و شیمیایی ترکیبات خاک مورد استفاده در مطالعه

خواص	کانولینیت	سیلیکا ژل	کانولینیت+ سیلیکا ژل ۱۰٪	کانولینیت+ کربنات ۱۰٪	کانولینیت+سیلیکا ژل +کربنات
pH	۲/۵±۰/۵	۶/۳±۰/۲	۵/۱۵±۰/۴	۷/۰۷±۰/۳	۷/۰۱±۰/۴
CFC (meq/100 g)	۸ ±۰/۴	۸۲±۵	۶۷±۵	۱۷±۲	۵۵±۳
سطح مخصوص (m <sup>2</sup> /g)	۱۲±۰/۲۰	۲۷۶±۱۰	۱۱۸±۷	۶۶±۴	۹۷±۷

شهری، بهداشتی، و زائادات خطرناک و اتمی است. هر چه میزان نفوذ پذیری خاک کمتر باشد، امکان عبور آب و مواد شیمیایی از آنها کمتر بوده و مواد شیمیایی زمان ماند بیشتری برای فعل و انفعالات شیمیایی و بیولوژیکی خواهند یافت و امکان تجزیه آنها افزایش می یابد. به منظور به دست آوردن نفوذپذیری، ابتدا خاک را بر اساس رطوبت بهینه تعیین شده در هر مورد، در داخل یک ستون شیشه‌ای استوانه‌ای متراکم کرده و در قسمت پایین خاک، یک لایه نفوذپذیر به منظور زهکشی و در قسمت بالا همچنین یک لایه از ماسه سنگ به منظور تسهیل در عبور مایعات از بالا تعبیه شده است. سپس در بالای ستون خاک، یک منبع و ارتباطات لازم برای تغذیه محلول به خاک و در قسمت پایین یک منبع و ارتباطات لازم برای جمع آوری آب عبوری و اندازه‌گیری مشخصات شیمیایی آن در زمانهای مختلف فراهم شده است.

نتایج به دست آمده درباره میزان نفوذ پذیری خاک در شکل ۲ الف، ب، ج و ۲-د نشان داده شده است. این منحنی ها میزان نفوذپذیری خاک را بر حسب سانتیمتر بر ثانیه نسبت به حجم آب عبوری از ستون خاک بر حسب حجم تخلخل خاک (یک حجم تخلخل خاک عبارت است از میزان تخلخل حجمی موجود در ستون خاک) بیان شده است [۱۰].

## ۳- تحلیل نتایج

### ۳-۱- نتایج به دست آمده و بحث در مورد تراکم پذیری خاک

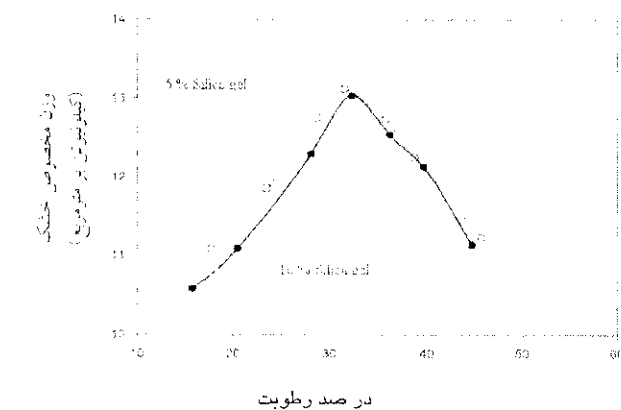
خاکهای تهیه شده، کانولینیت و همچنین کانولینیت ترکیب شده با سیلیکا ژل و کربنات کلسیم است. نمونه‌ها ابتدا خشک شده و سپس با افزایش آب به آن با در صد های مختلف و مخلوط کردن یکنواخت آن مطابق استاندارد پروکتور [۸] متراکم شد. نتایج به دست آمده به صورت منحنی تراکم خاک با ترکیبات مختلف در شکل ۱-الف، ب، ج و ۱-د نشان داده شده است. این منحنی ها در واقع وزن بخصوص خشک محاسبه شده خاک را نسبت به میزان در صد رطوبت خاک نشان می دهد. افزایش مواد افزودنی به خاک کانولینیت میزان تراکم پذیری خاک را افزایش می دهد. افزایش سیلیکا ژل به کانولینیت شیب منحنی تراکم را در دو طرف منحنی پایین آورده و در نتیجه امکان بدست آوردن رطوبت بهینه در زمین بهتر فراهم می گردد.

### ۳-۲- نتایج به دست آمده در زمینه اثر نوع خاک در نفوذپذیری

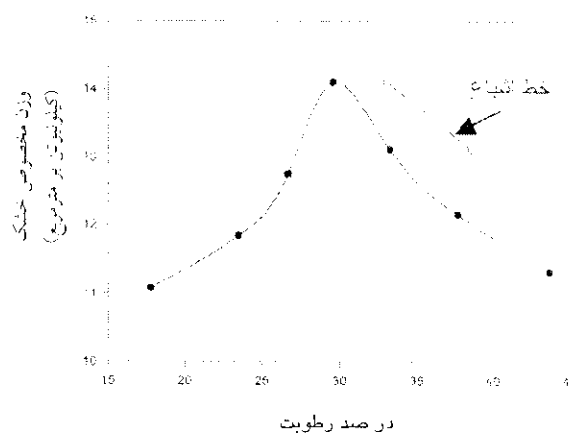
میزان نفوذپذیری خاک یکی از عوامل تعیین کننده در انتخاب آن برای استفاده در هسته سدها، عایق سازی کانالها و مخازن آب و لاگونهای ته نشینی و دفن مواد زائد

نفوذپذیری خاک ترکیبی، دو برابر کمتر از خاک اولیه است که این خود نشان دهنده کاهش فواصل بین دانه ای خاک حاصل و تراکم بهتر آنها است.

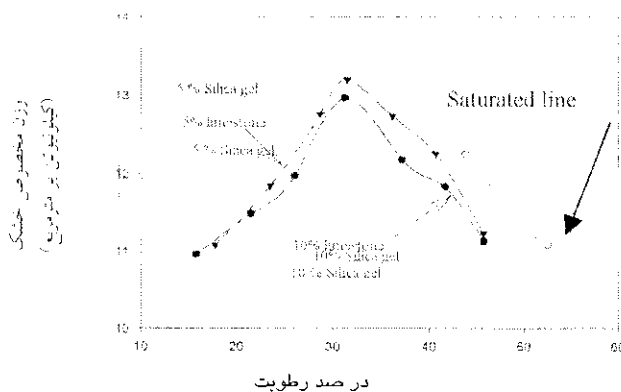
منحنی‌های ب ج و د در شکل ۲ در مورد خاک ترکیبی نشان دهنده آن است که مواد افزودنی نظیر سیلیکا ژل یا کربنات کلسیم، به مقدار زیادی می‌توانند نفوذپذیری خاک را کاهش دهند. این به دلیل فعل و نفعالات شیمیایی بین اجزای تشکیل دهنده خاک با آب است. میزان



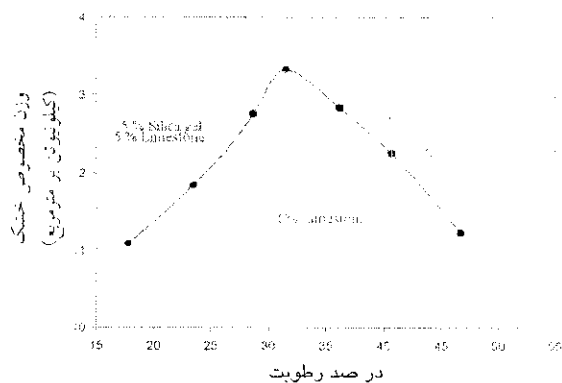
ب - کائولینیت + سیلیکاژل



الف - کائولینیت

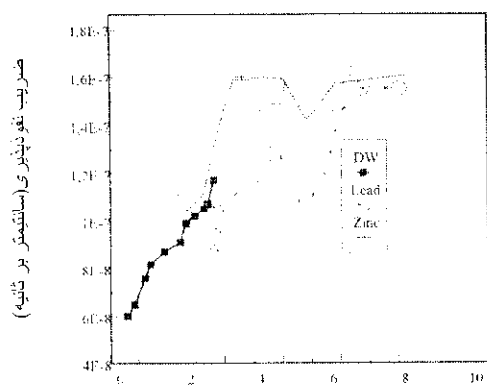


د - کائولینیت + سیلیکاژل + کربنات

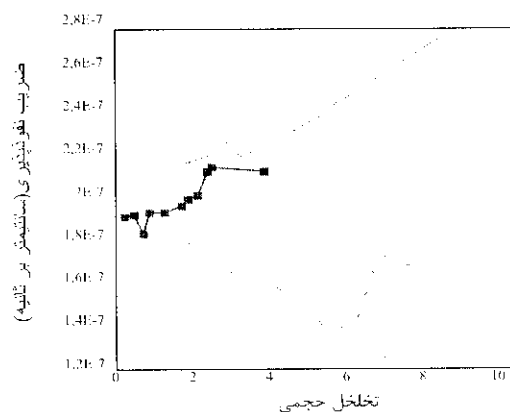


ج - مخلوط کائولینیت + کربنات

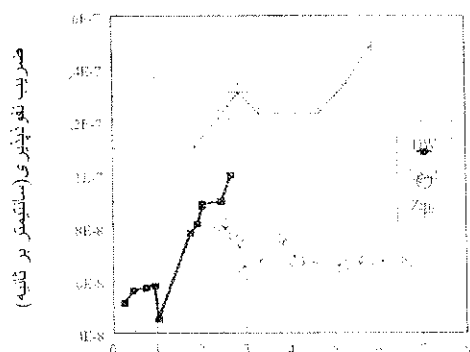
شکل ۱ اثر ترکیبات تشکیل دهنده خاک بر کیفیت تراکم آن



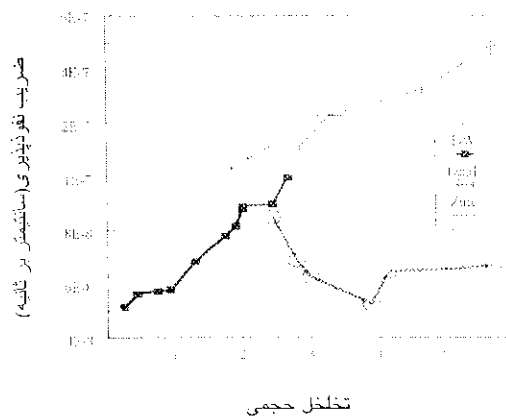
ب - کائولینیت + سیلیکاژل



الف - کائولینیت



د - کائولینیت + سیلیکاژل + کربنات



ج - مخلوط کائولینیت + کربنات

شکل ۲ اثر ترکیبات تشکیل دهنده خاک بر ضریب نفوذ پذیری آن

می‌توانند در ستون خاک جذب شده باشند و هم در لایه‌های خاک رسوب و خلل و فرج موجود را پر کرده باشند. غلظت سرب و روی در آب خروجی و ستون خاک، پس از هر واحد حجمی (با خارج کردن ستون خاک و تقسیم آن به پنج قسمت و حل کردن سرب به فاز آبی) مورد آزمایش جذب اتمی قرار گرفت. در مورد سرب و روی بعد از سه واحد حجمی در مورد کائولینیت و پنج تا هفت واحد حجمی و در مورد خاک ترکیبی، سرب و روی در آب خروجی مشاهده شد. این نتایج گویای آن است که سرب و روی در طول ستون جذب خاک شده‌اند. به‌عنوان نمونه در مورد خاک ساده، پس از

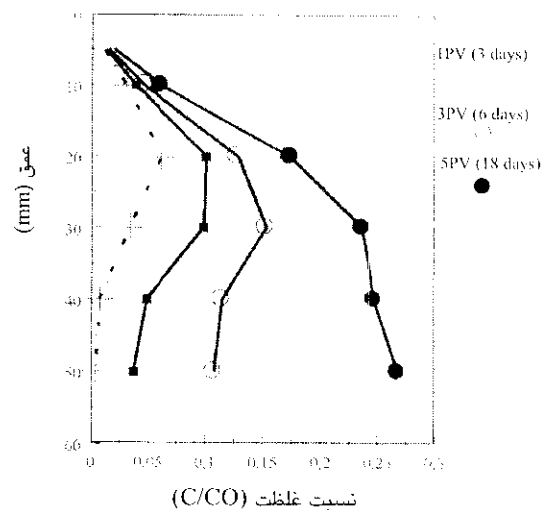
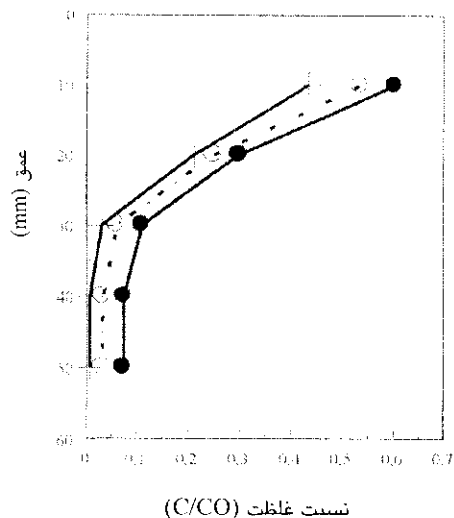
### ۳-۳- نتایج به‌دست آمده و بحث در

#### خصوص میزان عبور محلول سرب و روی

به خاک آماده شده در مرحله فوق محلول سرب و روی مخلوط با کلرید سدیم - به‌طور جداگانه - از بالا وارد شد. همان‌طور که در شکل ۳- الف و ۳- ب در مورد سرب و شکل ۴- الف و ۴- ب در مورد روی برای خاک کائولینیتی و خاک ترکیب شده با سیلیکاژل نشان داده شده است، محلول سرب و روی، سریعتر از ستون خاک کائولینیتی عبور می‌کند در حالی که زمان عبور محلول سرب و روی از خاک ترکیبی - به‌دلیل نفوذپذیری کمتر - بیشتر است. علاوه بر این ترکیبات سرب و روی، هم

عدم انتقال سریع سرب و روی در خاکهای ترکیبی، نفوذپذیری پایین خاکهای ترکیبی و قدرت جذب و رسوب دادن مواد شیمیایی به دلیل pH بالای آنها است.

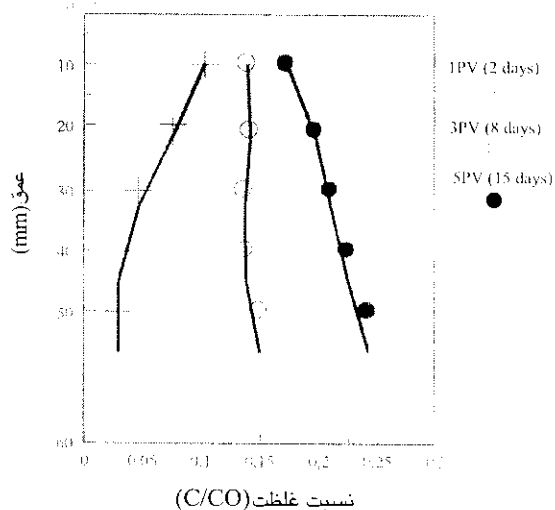
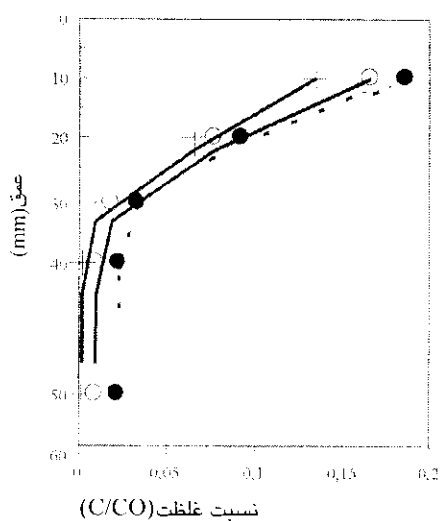
بیست روز سرب و پانزده روز روی در آب خروجی قابل بازیابی بود و لیکن این عمل در مورد خاکهای ترکیبی بخصوص سرب، بیش از صد روز به طول می انجامد. علت



ب - منحنی تغییرات غلظت سرب در کائولینیت + سیلیکازل

الف - منحنی تغییرات غلظت سرب در کائولینیت

شکل ۳ اثر نوع خاک بر عبور محلول سرب از ستون خاک



ب - منحنی تغییرات غلظت روی در کائولینیت + سیلیکازل

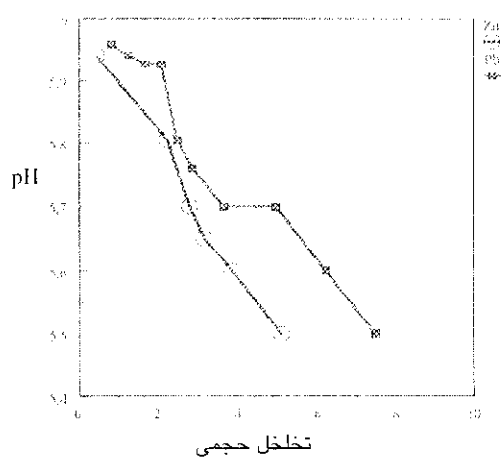
الف - منحنی تغییرات غلظت روی در کائولینیت

شکل ۴ اثر نوع خاک بر عبور محلول روی

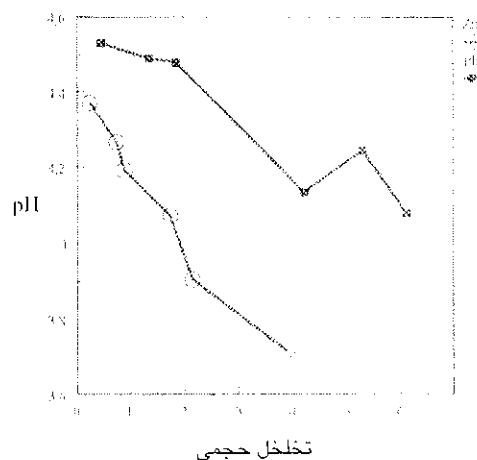
### ۳-۴- نتایج به دست آمده در خصوص pH خاک

کرده از خاک ترکیب شده با سنگ آهک (کربنات کلسیم) به مدت زیادی ثابت مانده و با وجود اینکه pH آب ورودی به خاک برابر ۳ (اسیدی) نگهداشته شده و pH آب خروجی بالاتر از ۶ باقی می ماند. افزایش pH موجب افزایش مقاومت خاک در مقابل فرسایش و ترکیبات اسیدی و جذب بیشتر مواد ارگانیک و معدنی و رسوب دادن مواد شیمیایی داخل آب در خاک و در نتیجه مسدود کردن خلل و فرج موجود در خاک می شود. که نتیجه آن، کاهش نفوذ پذیری خاک و افزایش درجه تراکم است.

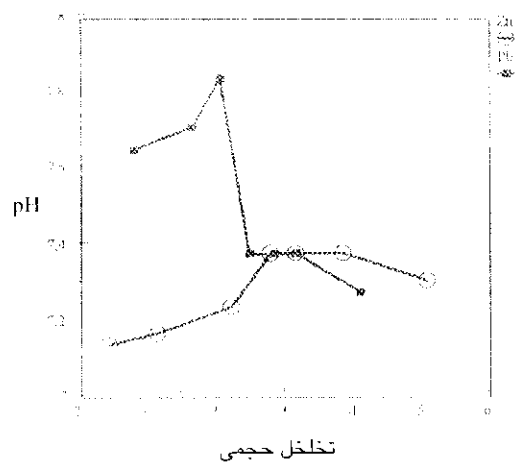
pH آب عبوری از خاک ساده و ترکیبات آن در زمانهای مختلف که معمولا بر حسب حجم تخلخل موجود در ستون خاک متراکم شده بیان می شود، در شکل ۵-الف تا د نشان داده شده است. همانطور که در منحنی تغییرات pH با آب حجم آب عبوری در زمانهای مختلف مشخص شده، مواد افزودنی به کائولینیت، موجب افزایش قدرت بافری خاک حاصل شده و pH حاصل آب عبور



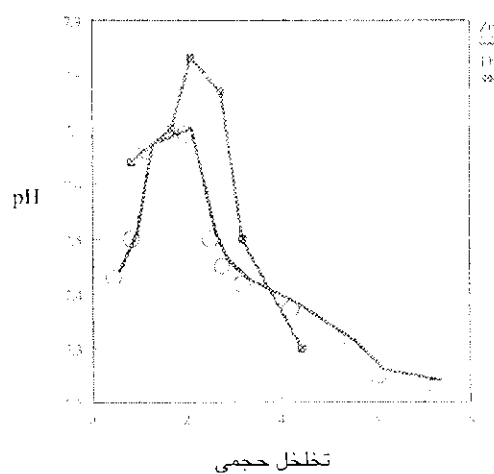
ب - کائولینیت + سیلیکازول



الف - کائولینیت



د - کائولینیت + سیلیکازول + کربنات



ج - مخلوط کائولینیت + کربنات

شکل ۵ pH آب عبور کرده از خاک با ترکیبات مختلف



### ۳-۵- مدل سازی رفتار شیمیایی خاک

برای پیش بینی فعل و انفعالات بین مواد تشکیل دهنده خاک و آب از مدل ژئوشیمی ارائه شده توسط [Darban] [۱۰] استفاده شد. این مدل فعل و انفعالات ژئوشیمیایی در طول ستون خاک و ترکیبات آن در حالت تعادل و تقسیم آنها به سه فاز محلول، فاز جذب شده به خاک و فاز رسوب یافته به اشکال گوناگون را پیش بینی می کند.

ورودی برنامه، مشخصات فیزیکی شیمیایی خاک و محلول ورودی و خروجی آن، غلظت ترکیبات شیمیایی در سه فاز فوق است. به عنوان نمونه در حالتی که خاک ترکیبی شامل کائولینیت + کرنات کلسیم + سیلیکا ژل باشد و از محلول سرب برای عبور از آن استفاده شود، خروجی برنامه و ترکیبات احتمالی حاصل در داخل لایه خاک در جدولهای شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ خلاصه شده است.

جدول ۲ یونهای محلول در ستون خاک

ID No.	Chemical Formula	ID No.	Chemical Formula
۳۳۰	H <sup>+</sup>	۶۰۰	Pb <sup>۲+</sup>
۱۸۰	Cl <sup>-</sup>	۱۵۰	Ca <sup>۲+</sup>
۵۰۰	Na <sup>+</sup>	۷۷۰	H <sub>۲</sub> SiO <sub>۴</sub>
۳۰	Al <sup>۳+</sup>	۱۴۰	CO <sub>۳</sub> <sup>۲-</sup>

جدول ۳ یونهای جذب شده و رسوب کرده در ستون خاک

ID No.	Chemical	ID No.	Chemical	ID No.	Chemical	ID. No.	Chemical
۸۲۱۶۰۰۲	SOPbOH	۵۰۰۱۴۰۰	NaCO <sub>۳</sub>	۶۰۰۱۸۰۳	PbCl <sub>۲</sub>	۶۰۰۳۳۰۵	Pb(OH) <sub>۲</sub>
۳۳۰۱۴۰۰	HCO <sub>۳</sub> <sup>-</sup>	۵۰۰۱۴۰۱	NaHCO <sub>۳</sub>	۶۰۰۱۴۰۰	Pb(CO <sub>۳</sub> ) <sub>۲-۲</sub>	۶۰۰۱۴۰۲	BHCO <sub>۳</sub> <sup>+</sup>
۳۰۱۴۰۱	H <sub>۲</sub> CO <sub>۳</sub> (aq)	۳۰۳۳۰۰	AlOH + ۲	۶۰۰۳۳۰۰	PbOH +	۸۱۱۳۳۰۰	=ISO-
۳۳۰۰۰۲۰	OH-	۳۰۳۳۰۱	Al(OH) <sub>۲+</sub>	۶۰۰۳۳۰۱	Pb(OH) <sub>۲</sub>	۸۱۱۳۳۰۲	-ISOH
۳۳۰۷۷۰۰	۲SiO <sub>۴</sub>	۳۰۳۳۰۲	Al(OH) <sub>۳</sub>	۶۰۰۳۳۰۲	Pb(OH) <sub>۳</sub>	۸۱۱۶۰۰۰	=ISOPb+
۳۳۰۷۷۰۱	۲SiO <sub>۴</sub>	۳۰۳۳۰۳	Al(OH) <sub>۳</sub>	۶۰۰۳۳۰۳	Pb <sub>۲</sub> OH + ۳	۸۱۱۵۰۰۰	SONa
۱۵۰۳۳۰۰	CaOH +	۶۰۰۱۸۰۰	PbCl +	۶۰۰۴۹۲۰	PbNO <sub>۳</sub> <sup>+</sup>	۸۱۱۶۰۰۲	-SOPbOH
۱۵۰۱۴۰۰	AlHCO <sub>۳</sub> <sup>+</sup>	۶۰۰۱۸۰۱	PbCl <sub>۲</sub>	۶۰۰۳۳۰۴	Pb <sub>۳</sub> (OH) <sub>۴</sub>	۸۲۱۳۳۰۰	-۲SO-
۱۵۰۱۴۰۱	CaCO <sub>۳</sub> AQ	۶۰۰۱۸۰۲	PbCl <sub>۳</sub> -	۶۰۰۱۴۰۱	PbCO <sub>۳</sub>	۸۲۱۳۳۰۲	=۲SOH
۸۲۱۵۰۰۰	=۲SONa						
۸۲۱۶۰۰۰	۲SOPb+						

جدول ۴ یونهای اشباع در ستون خاک

۸۶۰۳۰۰۱	KAOLINITE	۸۴۱۵۰۰۰	LEONHARDITE
۵۰۶۰۰۰۰	CERRUSITE.	۲۰۰۳۰۰۲	DIASPORE

جدول ۵ ترکیبات غیر اشباع در ستون خاک

ID No.	Chemical name	ID. No.	Chemical name
۸۶۰۳۰۰۰	HALLOYSITE	۲۰۷۷۰۰۳	SiO <sub>2</sub> (A,GL)
۵۰۱۵۰۰۰	ARAGONITE	۲۰۰۳۰۰۱	BOEHMITE
۵۰۱۵۰۰۱	CALCITE	۵۰۵۰۰۰۱	THERMONATR
۸۴۵۰۰۰۲	LOW ALBITE	۴۱۶۰۰۰۰	COTUNNITE
۸۴۵۰۰۰۲	ANALBITE	۴۱۶۰۰۰۲	PHOSGENITE
۸۴۱۵۰۰۱	ANORTHITE	۲۰۷۷۰۰۴	SiO <sub>2</sub> (A,PT)
۸۶۰۳۰۰۲	PYROPHYLLITE	۲۰۶۰۰۰۰	MASSICOT
۸۴۱۵۰۰۲	LAUMONTITE	۲۰۶۰۰۰۱	LITHARGE
۸۴۱۵۰۰۳	WAIRAKITE	۲۰۶۰۰۰۲	PBO. .3H <sub>2</sub> O
۲۰۱۵۰۰۰	LIME	۵۰۶۰۰۰۱	PB <sub>2</sub> OCO <sub>3</sub>
۲۰۱۵۰۰۱	PORTLANDITE	۵۰۶۰۰۰۲	PB <sub>3</sub> O <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
۸۲۱۵۰۰۲	OLLASTONITE	۸۲۶۰۰۰۰	PBSiO <sub>3</sub>
۸۲۱۵۰۰۳	P-WOLLSTANIT	۸۰۶۰۰۰۰	PB <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
۸۰۱۵۰۰۱	CA-OLIVINE	۲۰۶۰۰۰۴	PB(OH) <sub>2</sub>
۸۰۱۵۰۰۲	LARNITE	۴۱۶۰۰۰۳	LAURIONITE
۸۰۱۵۰۰۷	CA <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	۴۱۶۰۰۰۴	PB <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> Cl
۸۴۵۰۰۰۴	NEPHELINE	۵۰۶۰۰۰۳	YDCERRUSITE
۸۰۱۵۰۰۶	GEHLENITE	۲۰۶۰۰۰۵	PB <sub>2</sub> O(OH) <sub>2</sub>
۲۰۰۳۰۰۰	ALO <sub>3</sub> (A)	۸۴۵۰۰۰۱	ANALCIME
۲۰۷۷۰۰۰	CHALCEDONY	۲۰۰۳۰۰۳	GIBBSITE
۲۰۷۷۰۰۱	RISTOBALITE	۲۰۰۳۰۰۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۲۰۷۷۰۰۲	QUARTZ	۴۱۵۰۰۰۰	HALITE
۳۰۵۰۰۰۰	NATRON	۸۴۵۰۰۰۰	MAGADIITE

جامدات اشباع و جدول شماره ۵ جامدات غیر اشباع را نشان می‌دهد. جداول مزبور در ضمیمه ۱ آورده شده

جدول شماره ۲ یونهای محلول در داخل لایه خاک، جدول شماره ۳ یونهای جذب شده، جدول شماره ۴

خاک در کشت چند محصول زراعی؛ پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی؛ دانشگاه صنعتی اصفهان؛ دانشکده کشاورزی؛ ۱۳۷۹.

[۳] رجبی، قاسم؛ مطالعه آثار کود کمپوست بر شوری و آلودگی خاک و مقدار جذب عناصر سنگین توسط گیاه ذرت از خاکهای حاوی کود کمپوست؛ پایان نامه کارشناسی ارشد خاک شناسی؛ دانشگاه صنعتی اصفهان؛ دانشکده کشاورزی؛ ۱۳۷۱.

[۴] عصایان، ایوب؛ بررسی آلودگی کروم در خاک و آبهای زیرزمینی شیراز و چاره‌جویی؛ پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی؛ دانشگاه شیراز؛ دانشکده تحصیلات تکمیلی؛ ۱۳۷۵.

[۵] معماریان، حسین؛ زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک؛ انتشارات دانشگاه تهران؛ ۱۳۸۰.

[۶] یثربی؛ استفاده از مواد پوزولانی برای بهسازی خاک؛ گزارش پژوهشی تهیه شده برای مرکز تحقیقات وزارت راه و ترابری؛ ۱۳۸۰.

[7] Benson, C. H.; Zhai, H.; Wang, X.; "Estimating Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners;" ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 2; 1994; pp 366-387.

[8] Chabra, R.; Pleysier, J.; Cremers, A.; "The Measurement of the Cation Exchange Capacity and Exchangable Cations in Soil; A New Method ". Proceedings of the International Clay Conference; Applied Publishing Ltd. Illinois, U.S.A.; 1975; pp. 439-448.

[9] Darban, A. K.; Foriero, A.; Yong, R. N.; "The Effect of Soil Composition and Moisture Content on Dry Density and Hydraulic Conductivity of Clay Soils;" Constructing and Controlling Compaction of Earth Fills, ASTM STP (1384); D. W.

است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد، دو عامل جذب یونهای سرب و روی به خاک و رسوب کردن این یونها به دلیل افزایش pH محیط در بین فضای خالی موجود در خاک ترکیبی، علت اصلی متراکم شدن خاک می‌تواند باشد [۱۴-۱۱].

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیقات نشان می‌دهد که مواد پوزولانی و سنگ آهک می‌توانند به عنوان مواد مناسبی برای تثبیت خاکهای کم مقاومت در محل های سست انتخاب شوند. زیرا هم موجب تراکم بهتر خاک شده و هم خاک را در مقابل فرسایش، مقاوم‌تر و برای عایق سازی مناسب‌تر می‌نمایند و لذا می‌توانند به‌عنوان مانع خوبی برای نگهداری مواد آلاینده و جلوگیری از انتقال آنها به آبهای زیرزمینی عمل نمایند. تثبیت خاک به روش شیمیایی، امکان خوبی برای اصلاح خاک در محل است به شرط آنکه شیمی خاک، کاملاً شناخته شده و مواد لازم با توجه شرایط انتخاب شود.

#### ۵- توصیه

در این مطالعه از مواد آلی در ترکیبات خاک استفاده نشده، لذا آثار بیولوژیکی مواد در تراکم و نفوذ پذیری خاک در نظر گرفته نشده است. استفاده از مواد آلی و همچنین شستشو با مواد آلی توصیه می‌شود.

#### ۶- منابع

- [۱] ابراهیم‌زاده طاران، اکبر؛ انتشار فلزهای سنگین در آب. خاک، گیاهان مزارع جنوب زنجان؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد علوم بهداشتی؛ دانشگاه علوم پزشکی تهران؛ دانشکده بهداشت؛ ۱۳۶۸.
- [۲] باقری، محمدرضا؛ اثرهای پساب و سیستمهای آبیاری بر برخی خواص فیزیکی، شیمیایی و آلودگی

- [12] Kinuthia, J. M.; Wild, S.; Jones, G. I.; "Effect of Monovalent and Divalent Metal Sulphates on Consistency and Compaction of Lime-Stabilised Kaolinite;" *Applied Clay Science*, Vol. 14; 1999; pp. 27-37.
- [13] Yong, R. N.; A. M. O. Mohamed, M.; and B.P.; Warkentin "Principles of Contaminants Transport in Soil;" Elsevier Publications; 2000. pp. 328
- [14] Zhao, Youca; Song, Lijie; Li, Guojian; "Chemical Stabilization of MSW Incinerator Fly ashes, *Journal of Hazardous Materials* "; Volume 95; Issues 1-2; 2002; pp. 47-63.
- [10] Darban, A. K.; Foriero, A. K.; Yong, R. N.; "Evaluation of EDTA and Sodium Acetate to Remediate Different Clay Compacted Soil Contaminated with Lead ", *Canadian Geotechnical Conference*; Saskatchewan; 23-26 Oct. 1999; pp. 709-717.
- [11] Gordon, M.; Huebner, P.; Kmet, P.; "An Evaluation of the Performance of Four Clay-Lined Landfills in Wisconsin;" *Proc., 7<sup>th</sup> annu, Madison Waste Conf.*; University of Wisconsin-Madison; Madison, Wisconsin; 1984; pp. 399-460.