

# تأثیر خصوصیات سیال حفره‌یی حاوی آلاینده‌ی فلز سنگین در خطای آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر برگ

وحیدرضا اوحدی\* (استاد)

صلاح‌الدین حمیدی (کارشناس ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۵ (۳۳-۳۲)  
دوری ۲-۳۲، شماره ۲/۳، ص. ۳۳-۳۲

با توجه به اهمیت ویژه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی در پروژه‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی، تعیین بازه‌ی قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌ها عامل بسیار مهمی در پذیرش نتایج آزمایش‌ها به‌شمار می‌رود. هدف این پژوهش، تعیین تأثیر تغییر خصوصیات الکترولیت سیال حفره‌یی خاک در خطای نتایج آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر برگ است. بر این اساس، مجموعه‌ی آزمایش تحکیم و حدود اثر برگ در چند ۱۰ بار تکرار بر روی هر نمونه انجام شده است. در این راستا، نمونه‌های رسی بنتونیت با غلظت‌های مختلفی از آلاینده‌ی فلز سنگین سرب مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر خصوصیات سیال حفره‌یی به‌واسطه‌ی تغییر خصوصیات لایه‌ی دوگانه، مقدار COV نتایج آزمایش‌های حدود اثر برگ را حدود ۳۰ تا ۸۵ درصد و مقدار COV پارامترهای آزمایش‌های تحکیم را حدود ۴ تا ۷۰ درصد تغییر می‌دهد.

واژگان کلیدی: خطا، ضریب تغییرات (COV)، خصوصیات سیال حفره‌یی، کانی رسی، آلاینده‌ی فلز سنگین.

vahidouhadi@yahoo.ca  
salah\_hamidi63@yahoo.com

## ۱. مقدمه

استفاده از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، یکی از پایه‌های اصلی در انجام طراحی‌های مهندسی، پژوهش‌های آزمایشگاهی، و مدل‌سازی نظری است. در طراحی‌های پروژه‌های ژئوتکنیکی و خصوصاً پروژه‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی، استفاده از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک مستقیماً در نتایج طراحی تأثیر می‌گذارد. از آنجا که تنوع در خواص خاک در هر پروژه به‌طور جدایی‌ناپذیری به محل پروژه و به زمین‌شناسی منطقه‌ی خاص مربوط می‌شود، برای طراحی مناسب، باید تحلیل‌های ریسک و عدم قطعیت در منطقه انجام شود و ضرایب تغییرپذیری خاک منطقه مورد بررسی قرار گیرد.<sup>[۱]</sup> در زمینه‌ی تغییرپذیری نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی مکانیک خاک، پژوهش‌های زیادی انجام شده است،<sup>[۸-۱]</sup> که در آن‌ها با استفاده از پارامتر ضریب تغییرات (COV یا C.V.)، اثر تغییرپذیری خاک‌های مناطق مختلف جهان در نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک مطالعه و بازه‌ی تغییراتی برای COV آزمایش‌های مکانیک خاک خاک‌های مناطق مختلف ارائه شده است. در برخی از پژوهش‌ها، درخصوص توزیع مناسب برای پراکندگی داده‌ها نیز مطالعاتی صورت گرفته است.<sup>[۹-۱۵]</sup>

نتایج پژوهش‌های انجام شده بر دو مطلب اساسی تأکید دارد: ۱. برای هر کدام از آزمایش‌های مکانیک خاک، میزان تغییرپذیری خاک‌های مناطق مختلف با یکدیگر متفاوت است؛ ۲. برای یک نوع خاک مشخص، میزان تغییرپذیری نتایج آزمایش‌های مختلف مکانیک خاک متفاوت است. نتایج بخشی از مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که با وجود خطاهای متعارف موجود در نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، درصد و مقدار کانی‌های رسی می‌تواند در افزایش COV نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک تأثیر قابل توجهی داشته باشد.<sup>[۱۶]</sup> همچنین مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که پژوهش‌های وسیعی درخصوص تأثیر تغییرپذیری خاک‌های مناطق مختلف در وسعت و دامنه‌ی خطاهای آزمایش‌های مکانیک خاک انجام شده است. اما اساساً توجه خاصی به تأثیر تغییر خصوصیات الکترولیت سیال حفره‌یی در تغییرپذیری نتایج و خطای آزمایش‌های مکانیک خاک صورت نگرفته و این موضوع به‌صورت حلقه‌ی گم‌شده‌ی در زنجیره‌ی پژوهش‌های موجود مشهود است.

از این رو فقدان چنین مطالعاتی در آزمایش‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی برای مشخص شدن میزان صحت و قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌ها کاملاً محسوس است. تغییر خصوصیات الکترولیت سیال حفره‌یی، که سبب تغییر در خصوصیات لایه‌ی دوگانه، تغییر پتانسیل سطحی، و سایر خصوصیات خاک‌های رسی می‌شود،<sup>[۱۷]</sup> باعث تغییر در میزان و روند تغییر خطا در نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک خواهد شد.

در این پژوهش، به منظور مطالعه‌ی تأثیر خصوصیات الکترولیت سیال حفره‌یی در خطای نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، ۴ گروه آزمایش روی نمونه‌ی رسی بنتونیت و بنتونیت حاوی غلظت‌های کم، متوسط، و زیاد نترات سرب ( $Pb(NO_3)_2$ ) انجام

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۹/۵/۱۳۹۳، اصلاحیه ۴/۱۱/۱۳۹۳، پذیرش ۱۵/۱۱/۱۳۹۳.

شده است. از آنجا که آزمایش حدود اتربرگ از مهم‌ترین آزمایش‌های شناسایی خاک به‌شمار می‌آید و همچنین از آنجا که آزمایش تحکیم در تعیین ظرفیت باربری مجاز، میزان نشست‌پذیری دراز مدت خاک و در برخی موارد ظرفیت باربری بی‌نقش تعیین‌کننده‌یی دارد، در این پژوهش آزمایش‌های حدود اتربرگ و تحکیم برای بررسی این موضوع انتخاب شده است. در نهایت، در مطالعه‌ی حاضر تلاش شده است تا بازه‌ی قابل قبولی برای ضریب تغییرات (COV) و تعداد تکرار لازم برای هر آزمایش پیشنهاد شود.

## ۲. روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور مطالعه‌ی تأثیر خصوصیات الکترولیت سیال حفره‌یی در خطای نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک از نمونه‌ی رسی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلایندگی فلز سنگین سرب استفاده شده است.

علت انتخاب نمونه‌ی رسی بنتونیت، بزرگ بودن ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و قابل توجه بودن مساحت سطح مخصوص آن است. همچنین تغییر خصوصیات سیال حفره‌یی در بنتونیت، تغییرات مشهود در پارامترهای این خاک را به دنبال دارد و امکان مشاهده‌ی تغییرات رفتاری در بازه‌ی وسیعی از تغییر مشخصات سیال حفره‌یی خواهد داشت. نمونه‌ی رسی بنتونیت مورد استفاده در این پژوهش، بنتونیت تجاری با نام بنتونیت «فلات ایران»، تهیه شده در شرکت تجاری «ایران باریت» است.

مشخصات فیزیکی و زیست‌محیطی نمونه‌های رسی بنتونیت مورد مطالعه در این پژوهش، در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. به منظور مطالعه‌ی تأثیر

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی نمونه‌ی رسی بنتونیت.

مشخصات فیزیکی	بنتونیت
رس (%)	۷۶
لائی (%)	۲۳
ماسه (%)	۱
حد روانی (%)	۳۱۸٫۹
حد خمیری (%)	۳۴٫۷
شاخص خمیری (%)	۲۸۴٫۲
Gs	۲٫۷۹
طبقه‌بندی	CH

جدول ۲. مشخصات زیست‌محیطی نمونه‌ی رسی بنتونیت.

مشخصات	بنتونیت
pH	۹٫۹
درصد کربنات	۸ ± ۰٫۵
سطح مخصوص	۴۱۶ ± ۵
CEC (cmol/kg-soil) Na <sup>+</sup>	۴۸٫۸
Ca <sup>+</sup>	۱۴٫۵۵
Mg <sup>+</sup>	۱٫۴۶
K <sup>+</sup>	۰٫۴۲
کل	۶۵٫۲۳
d <sub>۰.۰۱</sub> : نتایج X-Ray	۱۲٫۳۹ A <sup>۰</sup>
ترکیب کانی	مونت موریلونیت + کوآرتز + کربنات

خصوصیات سیال حفره‌یی در خطای آزمایش‌های مکانیک خاک، براساس ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه‌ی رسی بنتونیت، ۳ غلظت کم، متوسط، و زیاد آلایندگی نیترات سرب (Pb(NO<sub>۳</sub>)<sub>۲</sub>) استفاده شده است. این ترکیب‌ها به این صورت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند:

۱. بنتونیت + Pb(NO<sub>۳</sub>)<sub>۲</sub> (cmol/kg-soil) ۱۰ (غلظت کم)؛

۲. بنتونیت + Pb(NO<sub>۳</sub>)<sub>۲</sub> (cmol/kg-soil) ۴۰ (غلظت متوسط)؛ در حدود مقدار آلایندگی قابل نگهداری توسط فاز کربنات خاک (با فرض آنکه هر یک، درصد کربنات موجود در خاک قابلیت نگهداری حدود ۵ cmol/kg-soil آلایندگی سرب را دارد)؛ [۱۹، ۲۰]

۳. بنتونیت + Pb(NO<sub>۳</sub>)<sub>۲</sub> (cmol/kg-soil) ۸۰ (غلظت زیاد)؛ حدود مجموع آلایندگی قابل نگهداری توسط فاز کربنات و ظرفیت تبادل کاتیونی بنتونیت.

### ۱.۲. روش انجام آزمایش

آزمایش تحکیم به روش [ASTM, D2435] انجام شده است. درصد رطوبت کلیه‌ی نمونه‌ها در مراحل مورد نیاز به روش [ASTM, D2216] تعیین شده است. مقدار چگالی دانه‌ها (Gs) به روش [ASTM, D854] اندازه‌گیری شده است. خصوصیات خمیری و روانی نمونه‌ها شامل: حدود اتربرگ (حد روانی، حد خمیری، و دامنه‌ی خمیری) براساس روش [ASTM, D2318] مشخص شده‌اند. همچنین با توجه به مشخصات فیزیکی به‌دست آمده از آزمایش‌های ذکر شده، طبقه‌بندی خاک موردنظر براساس [ASTM, D3282] صورت گرفته است.

### ۱.۱.۲. روش انجام آزمایش بر روی نمونه‌های بنتونیت حاوی آلایندگی و نحوه‌ی تجزیه و تحلیل داده‌ها

نمونه‌ی رسی بنتونیت، به واسطه‌ی سطح مخصوص، دامنه‌ی خمیری، خاصیت بافری و جذب زیاد، تغییرات خصوصیات مهندسی را بهتر نشان می‌دهد. بر این اساس انتظار می‌رود در آزمایش بر روی نمونه‌ی بنتونیت، امکان حصول قضاوت صحیح‌تری در مورد خطای نتایج آزمایش‌ها تحت تأثیر تغییر مشخصات سیال حفره‌یی حاصل شود. سه غلظت انتخاب شده، دامنه‌ی مناسبی از رفتار بنتونیت در مجاورت آلایندگی فلز سنگین را نشان می‌دهند. محلول ساخته شده به نسبت ۵۰ به ۱ به بنتونیت اضافه شده است. سپس نمونه‌ها به وسیله‌ی لرزاننده‌ی الکتریکی هر شبانه‌روز به مدت ۴ ساعت لرزانده شده و این روند تا ۹۶ ساعت ادامه یافته است تا فرایند جذب آلایندگی به خاک کاملاً انجام و نمونه همگن شود. سپس نمونه ساتریفیوژ شده است تا بخش سیال و خاک جدا شود. پس از خشک شدن در گرم‌خانه در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، نمونه‌ها با چکش پلاستیکی برای پودر شدن کوبیده شده‌اند. پس از این مرحله، درصد رطوبت موردنظر به نمونه‌ها اضافه و آزمایش‌های تحکیم با روش چگالی کنترل انجام شده‌اند. برای حذف تأثیر چگالی و درصد رطوبت، چگالی خشک و درصد رطوبت تمام نمونه‌های آلوده به فلز سنگین یکسان در نظر گرفته شده است (ω = ۲۵٪، γ<sub>d</sub> = ۱٫۴۰ g/cm<sup>۳</sup>).

در آزمایش حد روانی، روش تر به خشک استفاده شده است. بدین معنا که درصد رطوبت اولیه‌یی که به نمونه‌ها اضافه شده است، بیشتر از حد روانی بوده است. همچنین در آزمایش‌های تحکیم و حدود اتربرگ به منظور همگن شدن، نمونه‌ها مدت ۳۶ ساعت با رطوبت اولیه نگهداری و سپس آزمایش شده‌اند.

در این پژوهش به منظور تجزیه و تحلیل میزان خطا از پارامتر ضریب تغییرات (COV) استفاده شده است. ضریب تغییرات (COV)، یکی از معیارهای پراکنندگی

نسبی است، که از تقسیم انحراف معیار به میانگین محاسبه می شود (رابطه ی ۱):

$$COV \text{ or } C.V = \frac{S_x}{\mu_x} \quad (1)$$

که در آن،  $S_x$  انحراف معیار و  $\mu_x$  میانگین است. ضریب تغییرات برای مقایسه ی دو جامعه ی آماری در این موارد کاربرد بسیار ارزنده یی دارد: [۱] ۱. در مواردی که مقیاس ها یکسان نباشند؛ ۲. در مواردی که مقیاس ها یکسان است، ولی تفاوت زیادی در بزرگی مشاهدات وجود دارد؛ ۳. در مواردی که واریانس های جوامع یکسان، ولی میانگین هایشان متفاوت است.

بنابراین از آنجا که در آزمایش های تحکیم و حدود اتربرگ مقیاس ها یکسان نیستند، برای مقایسه از پارامتر COV استفاده شده است. فاصله ی اطمینان<sup>۲</sup> برای برازش توزیع آماری مناسب<sup>۳</sup>، ۹۵٪ است؛ یعنی مقدار  $\alpha$  برای درصد اطمینان  $(1 - \alpha) = 0.05, 0.10$  انتخاب شده است. برای محاسبه ی تعداد تکرار لازم برای هر آزمایش از مقدار  $\alpha = 0.05$  استفاده شده است.

### ۳. بحث و بررسی نتایج

در آزمایش های انجام شده بر روی نمونه ی بنتونیت در حضور آلاینده ی فلز سنگین سرب، آزمایش های حدود اتربرگ بیش از ۲۰ بار و آزمایش های تحکیم بیش از ۱۰ بار تکرار انجام شده است.

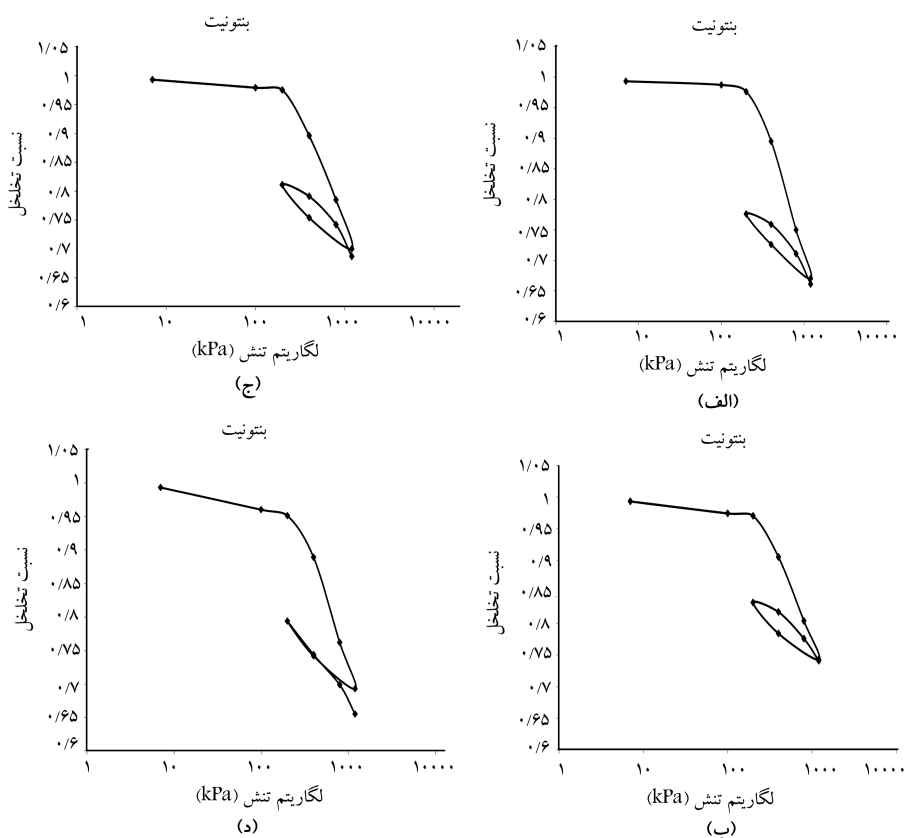
در شکل ۱، بخشی از نمودارهای مربوط به آزمایش های انجام شده بر روی نمونه ی رسی بنتونیت ارائه شده است. نمونه های مذکور فاقد آلاینده بوده اند. با توجه

به شکل ۱ مشاهده می شود که تطابق نسبی مناسبی بین نمودارهای حاصل از آزمایش های تحکیم برقرار است. براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱، نسبت تخلخل (نشانه ی خلا) کلیه ی نمونه ها حدود ۱ بوده است. در این سری از آزمایش ها، بارگذاری، باربرداری، و بارگذاری مجدد انجام و از نتایج بارگذاری مجدد برای تعیین ضریب تورم استفاده شده است.

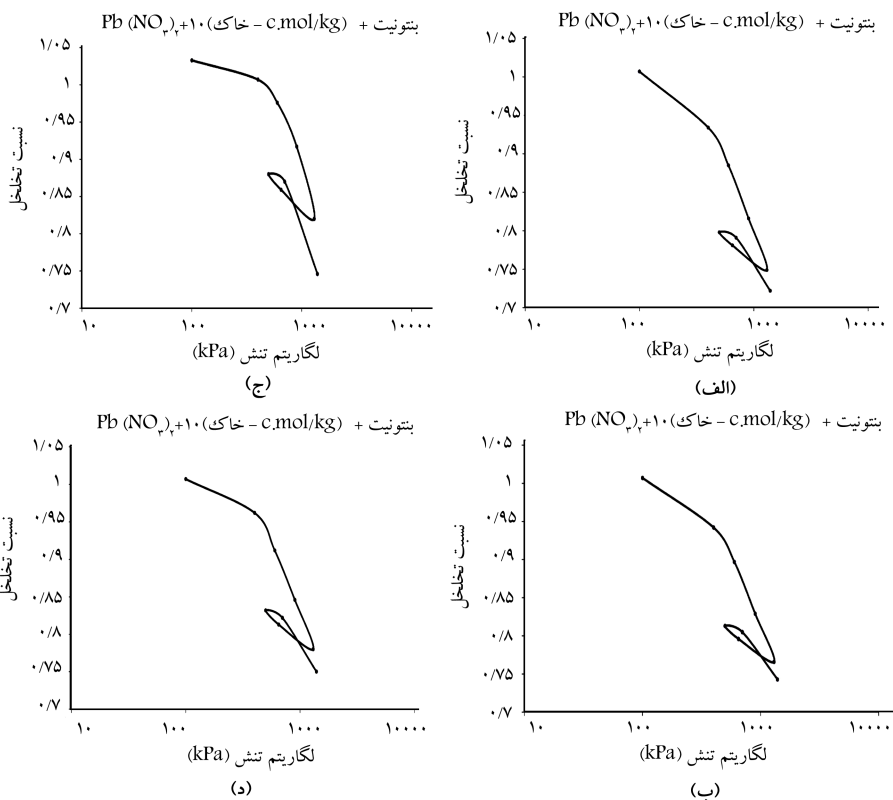
در شکل ۲، بخشی از نمودارهای آزمایش های تحکیم انجام شده بر روی نمونه ی بنتونیت حاوی ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم - خاک آلاینده ی فلز سنگین سرب ارائه شده است.

از ویژگی های نمودارهای مذکور، حصول نسبت تخلخل (نشانه خلا) اولیه برابر ۱ و مطابق نمودارهای شکل ۱ است. از آنجا که آزمایش ها در شرایط وزن مخصوص کنترل انجام شده است، اصولاً فرایند تحکیم اسمزی از نتایج آزمایش ها حذف می شود. [۲۰] به نظر می رسد در این سری از آزمایش ها خطای کمتری نسبت به حالت بدون آلاینده مشاهده می شود و نمودارها تطابق بیشتری با یکدیگر دارند. مقایسه ی کمی مقادیر خطا در دو سری آزمایش انجام شده و توجیه خطای کمتر در حالت حضور آلاینده، در ادامه به صورت تشریحی با استفاده از پارامتر COV مورد بحث قرار گرفته است.

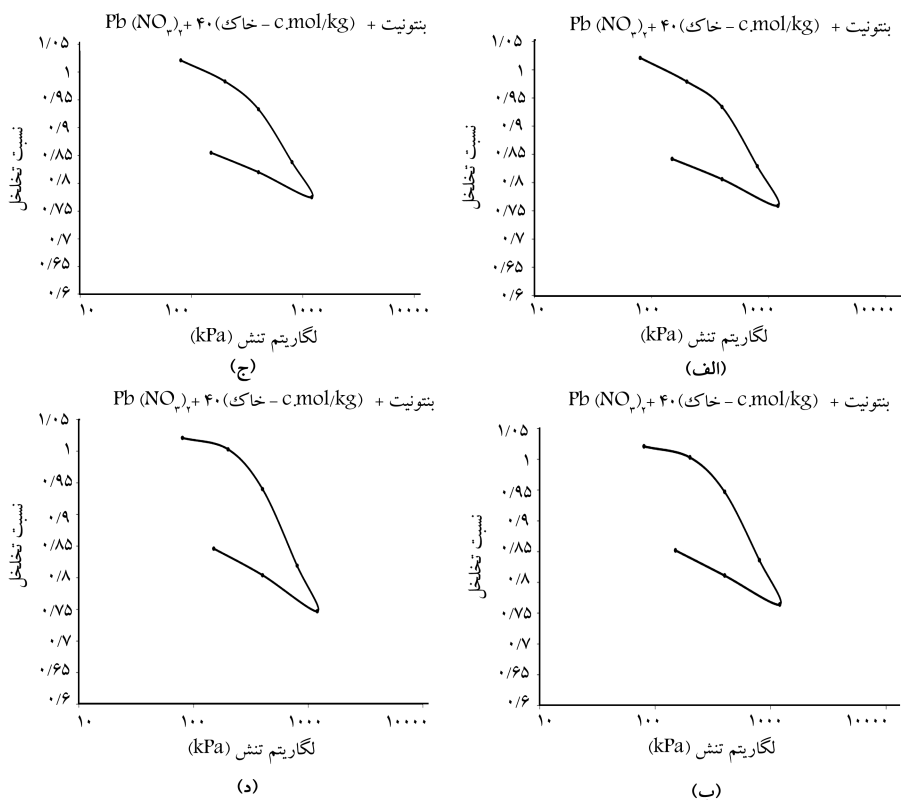
در شکل ۳، بخشی از نمودارهای آزمایش تحکیم انجام شده بر روی بنتونیت حاوی ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک آلاینده ی سرب نشان داده شده است. براساس ارزیابی ظاهری شکل ها مشاهده می شود که مقدار خطای مرتبط با شیب منحنی های تحکیم نسبت به دو حالت قبل کاهش یافته است. در نمونه های مذکور نیز نسبت تخلخل آن ها برابر ۱ در نظر گرفته شده است. غلظت آلاینده ی ذکر شده در حدود غلظت آلاینده ی قابل نگهداری توسط فاز کربنات خاک است. در این آزمایش ها



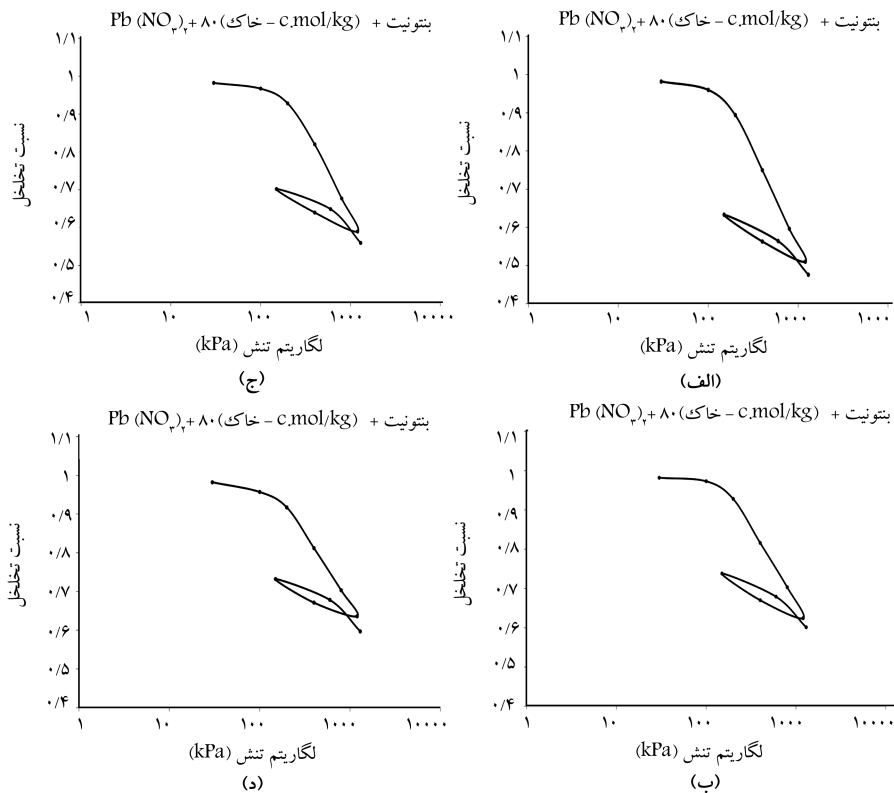
شکل ۱. بخشی از آزمایش های تحکیم نمونه ی رسی بنتونیت.



شکل ۲. بخشی از آزمایش‌های تحکیم بنتونیت حاوی ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک آلایندگی فلز سنگین سرب.



شکل ۳. بخشی از آزمایش‌های تحکیم بنتونیت حاوی ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک آلایندگی فلز سنگین سرب.



شکل ۴. بخشی از آزمایش‌های تحکیم بنتونیت حاوی ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک آلاینده‌ی فلز سنگین سرب.

آلاینده‌ی فلز سنگین به اندرکنش با آلاینده و جذب آن ورود می‌یابد.<sup>[۲۲]</sup> بر این اساس، در فرایند اندرکنش خاک رسی کربنات‌دار با آلاینده‌ی فلز سنگین، دو مکانیزم اثرگذار در میزان خطا قابل فرض است. در مکانیزم اول، در غلظت‌های کمتر از قابلیت نگهداری آلاینده توسط فاز کربنات، اگرچه عمدتاً فاز کربنات با آلاینده اندرکنش خواهد داشت، معذالک به علت نحوه‌ی نمونه‌سازی، عملاً بخشی از آلاینده در معرض پولک‌های رسی قرار می‌گیرد و با کاهش پتانسیل سطحی بخش رسی نمونه،<sup>[۲۱]</sup> ساختار بخش رسی نمونه از منظر نیروهای الکترواستاتیکی پایدارتر و سبب کاهش میزان خطای آزمایش‌ها می‌شود. هم‌زمان با افزایش غلظت آلاینده و شکل‌گیری رسوب کربناتی و نیز اندرکنش بیشتر رس و آلاینده‌ی فلز سنگین، تعداد فازهای اثرگذار در خطای آزمایش‌ها از دو فاز رس و کربنات به ۴ فاز رس، کربنات، رس اندرکنش کرده با آلاینده، و رسوب کربنات فلز سنگین افزایش می‌یابد. این مکانیزم برخلاف مکانیزم اول می‌تواند سبب افزایش خطای آزمایش‌ها شود. در این پژوهش، تعیین آنکه کدامیک از مکانیزم‌های فوق در آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر برگ به‌عنوان مکانیزم حاکم هستند، از اهداف تجزیه و تحلیل الگوهای خطای این دو آزمایش بوده است.

#### ۱.۱.۳. تجزیه و تحلیل خطای آزمایش‌های تحکیم

نتایج آزمایش تحکیم چه در بارگذاری و چه در باربرداری وابستگی شدیدی به اندرکنش و نحوه‌ی قرارگیری پولک‌های رسی نسبت به یکدیگر دارد. در شکل ۵، نمودار تغییرات COV برای پارامترهای ضریب فشردگی پذیری (Cc) و ضریب تورم (Cs) در آزمایش‌های تحکیم انجام‌شده بر روی نمونه‌ی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلاینده‌ی فلز سنگین سرب ارائه شده است. همچنان که مشاهده می‌شود، شکل کلی منحنی ضریب تغییرات یا مقدار خطا برای ضریب فشردگی و ضریب تورم، نسبتاً مشابه است. به این صورت که با افزایش آلاینده‌ی سرب تا حدود مقدار

بارگذاری مجدد پس از باربرداری انجام نشده است. مقایسه‌ی کمی خطاها در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

در شکل ۴، تعدادی از نمودارهای آزمایش تحکیم انجام‌شده بر روی بنتونیت حاوی آلاینده‌ی سرب با غلظت ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم - خاک نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها نیز نسبت تخلخل اولیه‌ی (نشانه‌ی خلا) نمونه‌ها برابر ۱ بوده و گام‌های بارگذاری مطابق آزمایش‌های مورد بحث در شکل‌های ۱ الی ۳ انجام شده است.

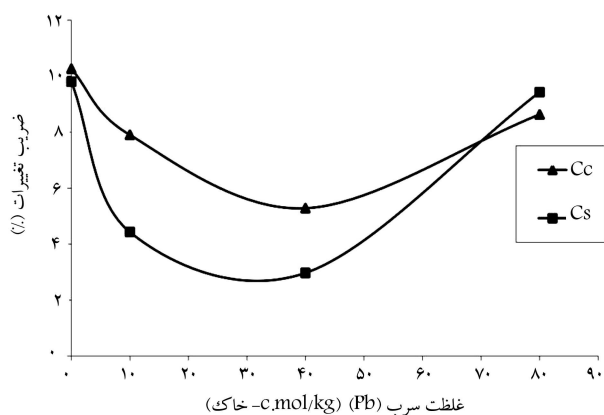
همچنان که از مشخصات ظاهری ارائه‌شده در شکل ۴ استنباط می‌شود، در این آزمایش‌ها نیز مقدار خطا همچنان کمتر از مقدار خطا نسبت به حالت بدون آلاینده است. تجزیه و تحلیل آماری نمودارهای مذکور نیز در ادامه‌ی نوشتار مورد بحث قرار گرفته است.

#### ۱.۳. تجزیه و تحلیل ریزساختاری میزان خطا با استفاده از پارامتر

##### ضریب تغییرات (COV)

در فرایند اندرکنش خاک و آلاینده‌ی فلز سنگین سرب، ساختار خاک از حالت پراکنده به درهم تغییر کرده و رفتار خاک اصطلاحاً به سمت رفتار دانه‌ی بی‌میل می‌کند.<sup>[۱۷-۲۱]</sup> بنابراین فرایند اندرکنش خاک - آلودگی موجب تغییراتی در نتایج آزمایش‌ها و میزان خطا خواهد شد. اصولاً در خاک‌های رس‌دار میزان خطای آزمایش‌ها بیش از خاک‌های دانه‌ی بی‌میل است.<sup>[۱۶]</sup>

از سوی دیگر، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در فرایند اندرکنش خاک‌های رسی کربنات‌دار با آلاینده‌های فلز سنگین، ابتدا بخش کربناتی خاک وارد واکنش با آلاینده می‌شود و بخش اعظم رس پس از تکمیل شدن فرایند اندرکنش کربنات و



شکل ۵. روند تغییرات COV پارامترهای آزمایش‌های تحکیم بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلایندگی.

آلایندگی قابل نگهداری توسط فاز کربنات بنتونیت، مقدار COV کاهش و سپس میزان آن افزایش یافته است. بنابراین، آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه با غلظت حدود قابل نگهداری توسط فاز کربناتی بنتونیت، کمترین مقدار خطا را نشان داده‌اند. از این رو غلظت مذکور، یک غلظت بهینه برای کاهش میزان خطا در آزمایش تحکیم به حساب می‌آید. تعیین غلظت بهینه برای کاهش میزان خطا در آزمایش تحکیم در محاسبه‌ی نشست نهایی خاک در صورت نشت آلودگی در خاک اهمیت کاربردی دارد. روند تغییرات میزان خطا (COV) در آزمایش تحکیم را به این صورت می‌توان توجیه کرد که در ابتدا با اضافه‌کردن آلایندگی فاز سنگین سرب تا غلظت ۴۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک به نمونه‌ی رسی، آلایندگی عمدتاً توسط فاز کربناتی و بخش کمتری نیز توسط پولک‌های رسی جذب می‌شود.<sup>[۱۲]</sup> با جذب آلایندگی و خنثی شدن بخشی از بارهای منفی سطح پولک‌های مونت‌موریلونیت در نمونه‌ی بنتونیت، از حساسیت و فعالیت نمونه‌ی رسی بنتونیت کاسته شده و نمونه‌ی رسی پایدارتر شده و میزان خطا کاهش یافته است. براساس نتایج حاصل، میزان خطا در نتایج ضریب فشردگی به میزان ۴۹٪ و در نتایج ضریب تورم به میزان ۷۰٪ نسبت به نمونه‌ی فاقد آلودگی کاهش یافته است. این درصدها در مطالعات پژوهشی و پروژه‌های اجرایی مقادیر قابل توجهی هستند.

با افزایش غلظت آلایندگی به مقادیر بیش از غلظت ۴۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک، اگرچه بخش بیشتری از بارهای منفی سطح پولک رسی خنثی می‌شود، لیکن همان‌گونه که اشاره شده است، علاوه بر دو فاز رس و کربنات، دو فاز دیگر نیز در نتایج آزمایش‌های تحکیم ورود پیدا می‌کنند، که افزایش فازها سبب افزایش خطا می‌شود.<sup>[۱۴]</sup> به طوری که با افزایش مقدار رسوب در نمونه،<sup>[۱۹]</sup> احتمال ناهمگنی در نمونه به واسطه‌ی توزیع آلایندگی رسوب‌شده در آن افزایش یافته و مقدار خطا بیشتر شده است. از این رو احتمال آنکه تجمع رسوب‌ها در نمونه‌های مختلف، در نقاط مختلف نمونه یکسان نباشد، بسیار زیاد است. در آزمایش تحکیم احتمالاً این رسوب‌ها، که چگالی بیشتری نسبت به چگالی دانه‌های جامد خاک دارند، در صورت تجمع در یک نقطه‌ی خاص از نمونه می‌توانند مانند عدسی‌های ماسه‌یی عمل کنند و به دلیل تغییر سرعت تحکیم در نقاط مختلف و ایجاد نشست‌های غیر یکنواخت کوچک، موجب بروز خطا در نتایج آزمایش تحکیم شوند. در همین راستا، نحوه‌ی تجمع یا پراکندگی و نقطه‌ی تجمع رسوب آلایندگی می‌تواند موجب پراکندگی بیشتر نتایج حاصل از نمونه‌های مختلف شود. به نظر می‌رسد این توزیع سبب شده است که در غلظت‌های بیشتر از قابلیت نگهداری فاز کربنات بنتونیت، مقدار COV افزایش یافته است. در همین راستا نتایج ارائه‌شده در شکل ۵ نشان می‌دهد که میزان

خطا (مقدار COV) در غلظت ۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک در نتایج ضریب فشردگی حدود ۳/۲ برابر میزان خطا (مقدار COV) در غلظت ۴۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک بوده است. همچنین میزان خطا در غلظت ۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک در نتایج ضریب تورم حدود ۱/۶ برابر مقدار COV در غلظت ۴۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک بوده است. اما مقدار خطا در همه‌ی غلظت‌ها کمتر از مقدار خطا در نمونه‌ی بنتونیت بوده است.

همچنین با دقت در منحنی‌های ارائه‌شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در بیشتر حالت‌ها، COV ضریب فشردگی بیشتر از COV ضریب تورم است. به طور متوسط مقدار COV ضریب فشردگی حدود ۱/۵ برابر COV ضریب تورم است. ضریب فشردگی براساس نتایج مراحل بارگذاری و ضریب تورم براساس نتایج مراحل باربرداری حاصل می‌شود. به نظر می‌رسد یکی از دلایل بیشتر بودن خطا در حالت بارگذاری نسبت به باربرداری آن است، که میزان تغییرشکل بیشتری در زمان بارگذاری نسبت به حالت باربرداری به وجود می‌آید. همچنین طی فرایند بارگذاری، خزش نیز در نمونه رخ می‌دهد.<sup>[۲۳]</sup> به طوری‌که عملاً نشست‌های ناشی از خزش در محاسبه‌ی ضریب فشردگی نیز لحاظ می‌شود. میزان و نحوه‌ی خزش به عوامل متعددی همچون: درصد رطوبت، میزان بار اعمالی، و نوع کانی رسی بستگی دارد. علاوه بر آن، میزان خزش به چیدمان و همگنی پولک‌های رسی به شدت وابسته است.<sup>[۲۳]</sup> نکته‌ی حائز اهمیت در اینجا آن است که در بارگذاری‌های تدریجی و کند، رس‌ها مخصوصاً رس‌های فعال، مقاومتی در برابر جابه‌جایی پولک‌های رسی هم‌جوار از خود نشان می‌دهند، این مقاومت در برابر تغییرشکل به چگالی، درصد رطوبت، دست‌خوردگی و نوع کانی رسی وابسته است.<sup>[۲۴]</sup> از آنجا که مقاومت به تغییرشکل به دافعه و جاذبه‌ی میان پولک‌های رسی نیز مربوط می‌شود، بنابراین همگنی در نمونه‌ها در پراکندگی نتایج اخذشده از آزمایش‌ها تأثیر ویژه‌ی می‌گذارد. همچنین از آنجا که میزان تغییرشکل در محاسبه‌ی ضریب فشردگی بیشتر است،<sup>[۲۱]</sup> و نیز مدت زمان لازم برای محاسبه‌ی ضریب فشردگی طولانی‌تر است و در این مدت زمان بیشتر، همچنان روند خزش ادامه دارد، بنابراین ناهمگنی در پارامترهای تعیین‌شده‌ی نمونه‌ی رس بیشتر تأثیر خود را نشان داده است. معمولاً در مرحله‌ی بارگذاری، در زمان‌های کمیته‌ی ۲۴ ساعت، بارها ۲ برابر می‌شوند؛ در حالی که در باربرداری در هر ۲۴ ساعت، ۷۵٪ بار موجود برداشته می‌شود. در واقع مدت زمان بیشتر صرف‌شده در بارگذاری، خزش بیشتر و بنابراین احتمال پراکندگی داده‌ها و در نتیجه افزایش مقدار COV در نتایج آزمایش‌های بارگذاری محتمل‌تر است. به صورت خلاصه می‌توان بیان کرد که چیدمان‌های مختلف در پولک‌های رسی، تغییرات در میزان جاذبه و دافعه بین پولک‌های رسی را به دنبال دارد و به تبع آن تغییرات در جاذبه و دافعه بین پولک‌ها، تغییرات در میزان تغییرشکل و خزش را به دنبال خواهد داشت. همه‌ی این موارد به پراکندگی بیشتر در میزان تغییرشکل و در نتیجه پراکندگی بیشتر در مقادیر ضریب فشردگی منجر شده‌اند، که در مجموع موجب افزایش مقدار COV ضریب فشردگی در مقایسه با COV ضریب تورم شده‌اند. علاوه بر آن، از آنجا که در آزمایش تحکیم، نمونه متراکم می‌شود، چگونگی اندرکنش پولک‌های رسی مجاور نسبت به یکدیگر، یک نقش کلیدی در نتایج آزمایش‌ها دارد.<sup>[۲۴]</sup> این اندرکنش‌ها، روند و نحوه‌ی انتقال بار از آب به خاک را کنترل می‌کنند و این مسئله در ضریب فشردگی بیشتر خود را نشان می‌دهد. بنابراین تأثیر پارامتر عدم همگنی در میزان خطا، در ساخت نمونه‌های لازم برای تکرار آزمایش تحکیم، در این ضریب بیشتر نمایان می‌شود. علاوه بر دلایل گفته‌شده در افزایش پارامتر COV ضریب فشردگی، مسئله‌ی که به صورت قابل توجهی در چیدمان پولک‌های رسی، همگنی، نحوه‌ی عملکرد لایه‌ی دوگانه‌ی پولک‌های رسی مجاور و نحوه‌ی توزیع رطوبت تأثیر

آزمایش‌های تحکیم، یک قله‌ی بیشینه دارد. علت این رفتار را می‌توان به تفاوت بین نحوه‌ی انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ با نحوه‌ی انجام آزمایش تحکیم نسبت داد. در آزمایش حدود اتربرگ به لحاظ انجام آزمایش به روش تر به خشک، با افزایش غلظت آلاینده و در مراحل کاهش رطوبت نمونه، جریان اسمزی ناشی از تغییر درصد رطوبت نمونه، سبب تغییر شرایط اولیه‌ی نمونه به لحاظ غلظت آلاینده‌ی محلول و جذب‌شده به رس شده و لذا یک افزایش قابل توجه در میزان خطا در غلظت  $40^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک مشاهده می‌شود. ضمن آنکه وجود رسوب و توده‌ی شدن ساختار نیز می‌تواند موجب عدم همگنی نمونه‌ها و توزیع غیریکسان رطوبت شود. همچنین، لازم به تأکید است که در آزمایش تحکیم، از آنجا که آزمایش به صورت وزن مخصوص کنترل انجام شده است، نمونه‌ی خاک پس از آلوده شدن کاملاً در قالب جاسازی شده است، در حالی که در آزمایش حدود اتربرگ عملاً فقط بخشی از خاک آلوده شده برای تعیین حد روانی و حد خمیری مورد استفاده قرار گرفته است، که این موضوع سبب حاکم شدن مکانیزم دوم ایجاد خطا در آزمایش‌های حدود اتربرگ نمونه‌های حاوی آلاینده‌ی فلزی شده است، که در بخش ۱.۳.۱. بدان اشاره شده است. حاکم شدن این مکانیزم سبب می‌شود که در غلظت نظیر  $40^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک، حصول قله در منحنی خطا در نتایج آزمایش حدود اتربرگ مشاهده شود. در همین راستا، در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده است که حساسیت زیاد و تنوع عکس‌العمل‌های رفتاری پولک‌های رسی در برابر وضعیت‌های محیطی مختلف همچون توزیع غیریکنواخت رطوبت، موجب پراکندگی نتایج و افزایش مقدار خطا و COV شده است.<sup>[۱۶]</sup>

در غلظت‌های بیشتر از قابلیت نگهداری آلاینده توسط فاز کربناتی، چون رفتار نمونه‌ی رسی به سمت رفتار دانه‌ی میلی می‌کند،<sup>[۱۸]، [۱۹]</sup> پراکندگی در نتایج حاصل شده کاهش پیدا کرده است. در واقع نرخ کاهش پتانسیل سطحی رس به بیشینه‌ی مقدار خود میل کرده و با حاکم شدن فرایند مذکور، میزان خطا مجدداً کاهش یافته است. در این حالت میزان خطا نسبت به غلظت  $40^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک، در نتایج حد خمیری به میزان  $47\%$  و در نتایج حد روانی به میزان  $32\%$  کاهش یافته است. با وجود این، به دلیل شکل‌گیری رسوب زیاد در نمونه، همچنان میزان خطا در این غلظت بیشتر از میزان خطا در غلظت  $10^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک بوده است. در این آزمایش‌ها و مخصوصاً آزمایش حد روانی، در غلظت  $80^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک با افزایش قابل توجه غلظت آلاینده، رفتار خاک به مقدار زیادی به سمت رفتار خاک‌های دانه‌ی میلی کرده و در واقع نمونه در این غلظت غیرخمیری شده است. با توجه به نکات ذکر شده در قبل، حصول رفتار غیرخمیری و دانه‌ی سبب کاهش COV نمونه در این محدوده از غلظت آلاینده شده است.

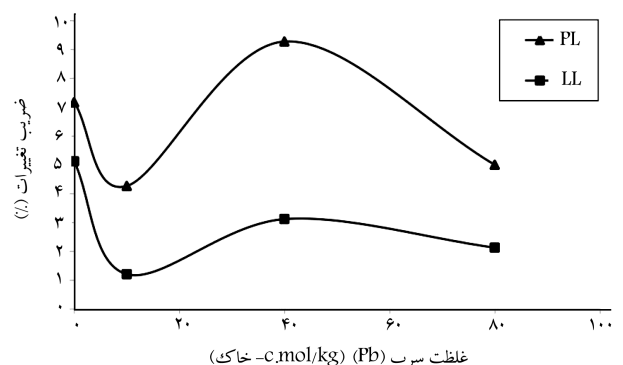
همچنین نتایج ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های رسی بتونیت آلوده به فلز سنگین سرب، COV مربوط به آزمایش‌های حد خمیری بیشتر از COV مربوط به آزمایش‌های حد روانی بوده است. به طور متوسط مقدار COV‌های آزمایش حد خمیری حدود  $27.6$  برابر COV‌های آزمایش حد روانی است. در آزمایش حد خمیری چون وزن نمونه‌ی مورد آزمایش کم است و نمونه‌ی خاک مورد آزمایش از نمونه‌ی آزمایش شده در آزمایش حد روانی برداشته می‌شود، احتمال عدم توزیع یکنواخت رسوب آلاینده‌ی فلز سنگین سرب در نمونه‌های مختلف برداشت شده در تکرار آزمایش بیشتر بوده است. این مسئله می‌تواند موجب پراکندگی نتایج به دست آمده شود و در نتیجه مقدار COV افزایش یافته است. از سوی دیگر، در نمونه‌های رسی توده‌ی یا لخته شده، احتمال عدم توزیع یکنواخت رطوبت هم زیاد است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که رفتار خاک‌های رسی به میزان قابل توجهی نسبت به تغییرات درصد رطوبت خاک

می‌گذارد، وجود رسوب آلاینده‌ی سرب در نمونه است.<sup>[۲۰]، [۲۱]</sup> به این صورت که در فرایند شکل‌گیری رسوب فلز سنگین در نمونه، احتمال عدم توزیع یکسان رسوب آلاینده‌ی فلز سنگین سرب در میان پولک‌های رسی موجود در نمونه زیاد است. همچنین با توده‌ی شدن پولک‌های رسی در حضور این آلاینده، نحوه‌ی اندرکنش پولک‌های رسی مجاور تغییر خواهد کرد. اما در محاسبه‌ی ضریب تورم، رس‌ها پس از اتمام مراحل تحکیم، به یک پایداری ساختاری نسبی می‌رسند. بنابراین احتمال پراکندگی در نتایج در باربرداری کمتر از حالت ضریب فشردگی است. بر این اساس، در بیشتر موارد COV ضریب فشردگی، بیشتر از COV ضریب تورم بوده است.

### ۳.۱.۳. تجزیه و تحلیل خطای آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری

حد روانی و حد خمیری جزء پارامترهای مهم شناسایی خاک هستند. تغییرات COV حدود اتربرگ بتونیت در حضور غلظت‌های مختلف آلاینده‌ی فلز سنگین سرب در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس نتایج ارائه شده در شکل مذکور روند تغییرات COV حد روانی و حد خمیری نسبتاً مشابه است. به صورت کلی در آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری با اضافه کردن  $10^{\circ}$  سانتی‌مول سرب به بتونیت، مقدار COV کاهش یافته است. با افزایش غلظت آلاینده به  $40^{\circ}$  سانتی‌مول (تا حدود مقدار آلاینده‌ی قابل نگهداری توسط فاز کربنات خاک)، مقدار COV افزایش یافته است. سپس با افزایش غلظت آلاینده به غلظت‌های بیشتر از مجموع آلاینده‌ی قابل نگهداری توسط فاز کربنات و ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه، مقادیر COV آزمایش‌های فوق کاهش نشان داده است. در آزمایش حدود روانی و خمیری در ابتدا با اضافه کردن غلظت  $10^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک آلاینده‌ی فلز سنگین سرب، آلاینده‌ی سرب با خشی کردن بخشی از بارهای منفی سطح پولک رسی، ساختار را پایدارتر می‌کند و COV کاهش می‌یابد. در محدوده‌ی فوق میزان خطا در نتایج حد خمیری به میزان  $40\%$  و در نتایج حد روانی به میزان  $76\%$  نسبت به حالت بدون آلاینده کاهش یافته است.

با افزایش غلظت آلاینده به حدود میزان غلظت  $40^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک (حدود غلظت قابل نگهداری توسط فاز کربنات نمونه)، COV افزایش یافته است. میزان خطا در غلظت  $40^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک در نتایج حد خمیری حدود  $27.2$  برابر مقدار خطا در غلظت  $10^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک و میزان خطا در غلظت  $40^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک در نتایج حد روانی حدود  $27.6$  برابر مقدار خطا در غلظت  $10^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک بوده است. این الگوی افزایشی خطا با الگوی خطای ارائه شده در شکل ۵ متفاوت است، به طوری که در غلظت  $40^{\circ}$  سانتی‌مول برکیلوگرم خاک، COV آزمایش‌های حدود اتربرگ برخلاف COV



شکل ۶. تغییرات COV آزمایش‌های حد خمیری و حد روانی بتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلاینده‌ی فلز سنگین سرب.

جدول ۳. مقادیر میانگین و COV پارامترهای آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر بزرگ بنتونیت حاوی آلایندگی سرب.

بنتونیت	Cc	Cs	PL	LL
میانگین	۰٫۴۷۹۶	۰٫۱۲۲۹	۳۴٫۷	۳۱۸٫۹
COV %	۱۰٫۳	۹٫۸	۷٫۲	۵٫۱
بنتونیت + ۱۰ سانتی مول Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Cc	Cs	PL	LL
میانگین	۰٫۳۹۸۷	۰٫۱۲۴۷	۳۰٫۴	۱۵۴٫۸
COV %	۷٫۹	۴٫۴	۴٫۳	۱٫۲
بنتونیت + ۴۰ سانتی مول Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Cc	Cs	PL	LL
میانگین	۰٫۳۷۰۲	۰٫۱۰	۲۹٫۴	۱۰۰٫۳
COV %	۵٫۳	۳٫۰	۹٫۳	۳٫۱
بنتونیت + ۸۰ سانتی مول Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Cc	Cs	PL	LL
میانگین	۰٫۴۱۰۸	۰٫۱۲۱۶	۲۶٫۹	۹۳٫۷
COV %	۸٫۶	۹٫۴	۵٫۰	۲٫۱

جدول ۴. بازه‌ی COV حاصل برای پارامترهای آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر بزرگ نمونه‌های بنتونیت حاوی آلایندگی سرب.

پارامتر	PL	LL	Cc	Cs
بازه‌ی تغییرات COV	۱۰-۴	۳-۱	۹-۵	۱۰-۳

جدول ۵. بازه‌ی COV حاصل برای آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر بزرگ نمونه‌های بنتونیت حاوی آلایندگی سرب.

آزمایش	حدود اثر بزرگ	تحکیم
بازه‌ی تغییرات COV	۱۰-۱	۱۰-۳

جدول ۶. مقادیر COV و تعداد تکرار لازم (R) برای هر آزمایش بر روی نمونه‌ی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلایندگی.

غلظت آلایندگی	R	R	COV	COV	R	R	COV	COV
	PL	LL	PL	LL	PL	LL	PL	LL
۰	۵	۴	۷٫۱۷	۵٫۱۲	۵	۵	۱۰٫۲	۹٫۸۰
۱۰	۳	۲	۴٫۲۷	۱٫۲۱	۳	۴	۷٫۹۰	۴٫۴۳
۴۰	۶	۳	۹٫۲۸	۳٫۱۲	۲	۲	۵٫۲۸	۲٫۹۷
۸۰	۴	۲	۵٫۰۰	۲٫۱۲	۴	۵	۸٫۶۳	۹٫۴۳

جدول ۷. جدول پیشنهادی میزان قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر بزرگ در پژوهش حاضر، براساس مبانی توزیع نرمال و مقادیر COV.

میزان قابل اعتماد بودن	مقدار % COV
عالی	COV ≤ ۵
خوب	۵ ≤ COV ≤ ۱۰
متوسط	۱۰ ≤ COV ≤ ۲۰
ضعیف	۲۰ ≤ COV ≤ ۴۰
بسیار ضعیف	۴۰ ≤ COV

میزان قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌ها در حالت حضور آلایندگی فلز سنگین سرب در مقایسه با نمونه‌های فاقد آلایندگی بیشتر بوده است.

در جدول‌های ۴ و ۵، خلاصه‌ی بازه‌ی پیشنهادی برای تغییرات COV برای آزمایش‌های این پژوهش ارائه شده است. در حالت کلی از آنجا که مقدار COV بیان می‌کند که یک آزمایش تا چه میزان قابل اعتماد است، بنابراین نتایج ارائه شده در جدول‌های مذکور برای استفاده در مطالعات پژوهشی و برای تعیین الگوی آزمایش‌ها قابل استفاده است. همچنین از داده‌های جدول‌های ۴ و ۵ می‌توان تعداد تکرار لازم برای هر آزمایش به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج را به دست آورد. شایان ذکر است که استفاده از بازه‌های انتخاب شده منوط به رعایت اصول نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها براساس استانداردهای معتبر است، در غیر این صورت میزان قابل اعتماد بودن نتایج آزمایش‌ها کاهش خواهد یافت.

در جدول ۶، نتایج ضریب تغییرات و تعداد تکرار لازم برای اطمینان از نتایج حاصل شده با فاصله‌ی اطمینان ۹۵٪ برای هر آزمایش ارائه شده است (R تعداد تکرار لازم برای محاسبه‌ی هر پارامتر). در این جدول تعداد تکرار لازم براساس تقریب توزیع نرمال داده‌ها محاسبه شده است. جدول ۶، به دو سؤال اساسی مهندسان ژئوتکنیک مبنی بر آنکه: ۱. چه تعداد آزمایش برای حصول اطمینان از صحت نتایج کافی است؟ و همچنین، ۲. میزان قابل اعتماد بودن نتایج هر آزمایش چقدر است؟ پاسخ می‌دهد. به همین منظور در جدول ۷، میزان قابل اعتماد بودن نتایج

حساس است.<sup>[۱۶ و ۲۴]</sup> بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیشتر بودن ضریب تغییرات نتایج آزمایش‌های حد خمیری به نحوه‌ی توزیع درصد رطوبت در نمونه نیز مربوط است. در واقع در خاک‌های حاوی کانی‌های رسی، حتی تغییرات بسیار کم مقدار آب نمونه، می‌تواند در تغییر ساختار خاک تأثیرات قابل توجهی داشته باشد. پژوهش‌های پیشین نیز نشان می‌دهد که اصولاً در حضور آب به‌عنوان سیال حفزه‌ی، خطای آزمایش حد خمیری بیشتر از خطای آزمایش حد روانی است.<sup>[۷]</sup>

### ۲.۳. پیشنهاد بازه‌ی مناسب تغییرات COV برای نتایج آزمایش‌ها و تعیین تکرار لازم برای هر آزمایش

در جدول ۳، مقدار میانگین و COV نتایج آزمایش‌های تحکیم و حدود اثر بزرگ بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف آلایندگی فلز سنگین سرب حاصل از تکرار آزمایش‌ها ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول مذکور مشاهده می‌شود که به استثناء غلظت ۴۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک آلایندگی سرب، مقدار خطای پارامترهای آزمایش‌های تحکیم بیشتر از خطای آزمایش‌های حدود اثر بزرگ است. به‌صورت میانگین مقدار COV در آزمایش‌های تحکیم برای ۴ غلظت مورد آزمایش، ۱٫۶ برابر COV مربوط به آزمایش‌های حدود اثر بزرگ است. یکی از دلایل وجود COV بسیار بزرگ‌تر در نتایج آزمایش‌های تحکیم، استفاده از نمونه‌های رسی با خاصیت خمیری، حساسیت و فعالیت زیاد در مطالعه‌ی حاضر بوده است. همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شده است، طی فرایند تحکیم، با خروج بخشی از الکترولیت از نمونه، نیروهای بین‌ذره‌ی دستخوش تغییرات زیاد قرار گرفته و به علت عدم زهکشی یکسان فشار آب حفزه‌ی در نمونه و عدم خروج یکسان آب از نمونه، تغییرات ذکر شده در عمق نمونه یکسان نخواهد بود. بنابراین ناهمگنی مذکور، انتظار حصول COV بزرگ‌تری را فراهم می‌کند.

نتیجه‌ی دیگر قابل حصول از نتایج جدول ۳، که در مطالعات پیشین مورد توجه قرار نگرفته است، توجه به این نکته است که در تمامی نتایج (به استثناء COV حد خمیری در غلظت ۴۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک)، مقدار COV حاصل برای نمونه‌های حاوی آلایندگی، کمتر از مقادیر ذکر شده برای نمونه‌ی رسی بنتونیت فاقد آلایندگی بوده است. این مسئله بیانگر آن است که میزان خطا در آزمایش‌های حاوی فلز سنگین سرب در مقایسه با نمونه‌های رسی فاقد آلایندگی کمتر بوده و در نتیجه



و آلودگی است. در واقع حضور آلاینده فقط موجب افزایش یا کاهش خطا نمی‌شود، بلکه براساس اندرکنش خاک و آلودگی، بازه‌های خاصی از غلظت آلاینده موجب کاهش و بازه‌های خاصی نیز موجب افزایش خطا می‌شوند، که این بازه‌ها برای آزمایش‌های مختلف مکانیک خاک بسته به شرایط هر آزمایش، متفاوت است.

۴. وجود رسوب آلاینده‌ی فلز سنگین سرب و توده‌ی شدن ساختار نمونه‌ی رسی بنتونیت در مجاورت آلاینده، موجب ایجاد ناهمگنی و توزیع غیر یکسان رطوبت است، بنابراین مقدار COV در مجاورت آلاینده تغییر خواهد کرد.

۵. با توجه به مقادیر COV در حضور آلاینده‌ی فلز سنگین سرب، نتایج آزمایش‌های تحکیم و حدود اتربرگ، قابلیت اعتماد بسیار خوبی دارد.

۶. در حضور آلاینده‌ی فلز سنگین، مقدار خطای ایجاد شده در آزمایش حد خمیری بیشتر از حد روانی است، همچنین در بیشتر حالت‌ها مقدار خطای ایجاد شده در ضریب فشردگی بیشتر از ضریب تورم است.

۷. مقدار COV در آزمایش تحکیم، حدوداً ۱٫۶ برابر COV مربوط به آزمایش‌های حدود اتربرگ است.

۸. از آنجا که نتایج COV و تعداد تکرار لازم حاصل شده، میزان قابل اعتماد بودن و تعداد تکرار لازم برای هر آزمایش را بیان می‌کند، بنابراین کاربرد مناسبی در مطالعات پژوهشی و پروژه‌های اجرایی ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی دارد. همچنین با شناخت عوامل خطا در نمونه‌های رسی حاوی آلاینده، می‌توان در راستای حذف خطاهای مذکور در حین نمونه‌سازی و انجام آزمایش اقدام کرد. در همین راستا یکی از راه‌های کاهش خطا و افزایش قابلیت اعتماد، انتخاب بازه‌هایی از غلظت آلاینده است، که کمترین مقدار خطا را دارند.

آزمایش‌های تحکیم و حدود اتربرگ براساس نتایج COV نوشتار حاضر محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۷، که جدولی کاربردی است، میزان قابل اعتماد بودن نتایج را نشان می‌دهد. بازه‌های پیشنهادی در جدول ۷ براساس میزان خطای قابل قبول برای هر آزمایش براساس داده‌های آزمایشگاهی، مبانی آماری و مبانی اصلی توزیع نرمال محاسبه و پیشنهاد شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از آزمایش‌های حدود اتربرگ و تحکیم نمونه‌ی بنتونیت حاوی غلظت‌های مختلف فلز سنگین سرب، قابلیت اعتماد مناسبی دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به این شرح بیان کرد:

۱. همواره میزان و روند تغییرات خطا و مقدار COV، یک تابع صعودی از دامنه‌ی خمیری نیست و کاملاً به اندرکنش پولک‌های رسی مجاور با یکدیگر، خصوصیات لایه‌ی دوگانه و سایر مشخصه‌های خاک و همچنین تغییر خصوصیات الکترولیت سیال حفره‌ی وابسته است.

۲. حضور فلز سنگین سرب در آب حفره‌ی سبب تغییر در خصوصیات لایه‌ی دوگانه‌ی خاک رسی می‌شود. براساس درصد کرنات خاک و غلظت آلاینده در نمونه، میزان خطا در نتایج اخذ شده از آزمایش‌های مکانیک خاک تغییر می‌کند.

۳. میزان و نرخ تغییر خطا در آزمایش‌های تحکیم و حدود اتربرگ در خاک‌های رسی حاوی آلاینده‌ی فلز سنگین سرب، وابسته به اندرکنش ریزساختاری خاک

#### پانویس‌ها

1. coefficient of variation
2. confidence interval
3. goodness of fit
4. characteristic

#### منابع (References)

1. Baecher, G. and Christian, J., *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, **8**, pp. 181-203 (2003).
2. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., *Soil Mechanics*, New York, John Wiley & Sons, Reproduced with Permission (1969).
3. Sherwood, P.T. "An examination of the reproducibility of soil classification and compaction tests", Symposium on Quality Control of Road Works, Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (1970).
4. Hoeg, K. and Murarka, R.P. "Probabilistic analysis of a retaining wall", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **100**(GT3), pp. 349-370 (1974).
5. Minty, E.J., Smith, R.B. and Pratt, D.N. "Interlaboratory testing variability assessed for a wide range of NSW soil types", *3rd International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, Sydney, pp. 221-235 (1979).
6. Ingles, O.G. and Metcalf, J.B., *Soil Stabilization: Principles and Practice*, New York, John Wiley & Sons (1973).
7. Stamatopoulos, A.C. and Kotzias, P.C. "The relative value of increasing number of observations", *Second International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, Aachen, pp. 495-510 (1975).
8. Lacasse, S. and Nadim, F. "Uncertainties in characterizing soil properties", *Uncertainty in the Geologic Environment*, Madison, ASCE, pp. 49-75 (1996).
9. Tanaka, H., Loat, J., Shibuya, S., Soon, T.T. and Shiwakoti, D. "Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake clays", *Canadian Geotechnical Journal*, **38**(2), pp. 378-400 (2001).

10. Lumb, P., *Application of Statistics in Soil Mechanics*, Soil Mechanics: New Horizons, Lee, I. K., ed., London, Newnes-Butterworth, pp. 44-112 and pp. 221-239 (1974).
11. Zhu, G., Yin, J.H. and Graham, J. "Consolidation modelling of soils under the test embankment at Clek Lap Kok international airport in Hong Kong using a simplified finite element model", *Canadian Geotechnical Journal*, **38**(2), pp. 349-363 (2001).
12. Benson, C.H. "Probability distributions for hydraulic conductivity of compacted soil liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **119**(3), pp. 471-486 (1993).
13. Christian, J.T., Ladd, C.C. and Baecher, G.B. "Reliability applied to slope stability analysis", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120**(12), pp. 2180-2207 (1994).
14. Baecher, G.B. and Ladd, C.C. "Formal observational approach to staged loading", *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, **1582**(1), pp. 49-52 (Dec. 1997).
15. Kulhawy, F. H. and Phoon, K.K. "Engineering judgment in the evolution from deterministic to reliability-based foundation design", *Uncertainty in the Geological Environment*, Madison, WI, ASCE, pp. 29-49 (1996).
16. Ouhadi, V.R. "Effect of clay minerals on the error associated with soil mechanics experiments", *Geotechnique and Strength of Materials Journal*, **83**, pp.61-66 (1999).
17. Krishna, B.G. and Gupta, S.S. "Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review", *Advances in Colloid and Interface Science*, **140**(2), pp. 114-131 (2008).
18. Ouhadi, V. R. and Amiri, M. "Geo-environmental behaviour of nanoclays in interaction with heavy metals contaminant", *Amirkabir J. of Civil and Environmental Engineering (Amirkabir)*, **42**(3), pp. 29-36 (2011).
19. Ouhadi, V.R., Amiri, M. and Goodarzi, A.R. "The special potential of nano-clays for heavy metal contaminant retention in geo-environmental projects", *Journal of Civil and Surveying Engineering*, **45**(6), pp. 631-642 (2012).
20. Ouhadi, V.R., Yong, R.N. and Sedighi, M. "Influence of heavy metal contaminants at variable pH regimes on rheological behaviour of bentonite", *Elsevier Appl. Clay Sci. J.*, **32**(3-4), pp. 217-231 (2006).
21. Ouhadi, V.R., Yong, R.N. and Sedighi, M. "Desorption response and degradation of buffering capability of bentonite, subjected to heavy metal contaminants", *Engineering Geology*, **85**(1-2), pp. 102-110 (2006).
22. Yong, R.N., *Geoenvironmental Engineering: Contaminant Soils, Pollutant Fate and Mitigation*, By CRC Press, 307 p. (2000).
23. Cetin, H. "Soil-particle and pore orientations during consolidation of cohesive soils", *Elsevier Engineering Geology*, **73**(1-2), pp. 1-11 (2004).
24. Yong, R.N. and Ouhadi, V.R. "Reaction factors impacting on instability of bases on natural and lime stabilized marls", *Special International Conference on Foundation Failures*, Lecture, Keynote Paper, Singapore, pp. 87-97 (1997).