



بررسی عملکرد مقاومتی جاذب های مختلف در خاک های آلوده با فلز سنگین سرب

محمد حسین زاده، محمود حسنلوراد*، سید ابوالحسن نائینی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷

کلمات کلیدی:

ماسه رس دار
نیترات سرب
ژئولیت
بنتونیت
آزمایش سه محوری

خلاصه: گسترش مناطق صنعتی در طی چند دهه گذشته و به دنبال آن افزایش پساب های صنعتی، سبب افزایش آلودگی فلزات سنگین در خاک ها و منابع آب زیرزمینی گردیده است. یکی از مهم ترین فرآیندهای مؤثر بر سرنوشت آلاینده ها در خاک، جذب آن توسط جاذب های موجود در ترکیب خاک است. از طرفی با توجه به اینکه ملاحظات اقتصادی همواره به عنوان یکی از اصول اساسی در طرح ها مطرح می گردد، استفاده از جاذب های طبیعی و ارزان قیمت مانند ژئولیت و رس ها در خاک هایی که در معرض نشت آلاینده های فلزات سنگین قرار دارند، به عنوان یکی از راهکارهای بهسازی معرفی شده است. در این تحقیق به کمک آزمایش های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده، به بررسی رفتار خاک ماسه حاوی ۱۵٪ کائولینیت به عنوان خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های طبیعی غیرخمیری (کائولینیت و ژئولیت) و خمیری (بنتونیت) در دو حالت آلوده با فلز سنگین سرب و غیرآلوده پرداخته شده است. نتایج نشان داد افزایش غلظت آلاینده در خاک-هایی که جاذب آن دارای خاصیت خمیری کم می باشد، تغییرات ساختاری ایجاد شده در جاذب، به طور متوسط باعث کاهش ۲۰٪ و ۱۴٪ درصدی در مقاومت نهایی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می شود. با تغییر در نوع کانی جاذب، پارامترهای مقاومتی خاک آلوده روند متفاوتی خواهند داشت، به طوری که افزایش غلظت سرب در خاک حاوی جاذب بنتونیت، منجر به ایجاد ساختار فلوکوله ای و افزایش حدوداً ۱۸٪ درصدی در مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی می گردد. چسبندگی در ترکیب خاک و جاذب با خاصیت خمیری کم و زیاد به ترتیب در حدود ۳۰٪ و ۱۹٪ افزایش و کاهش می یابد.

۱- مقدمه

حسنلوراد و همکاران نشان داد، تغییر در نوع کانی رسی، باعث تغییر در روند پارامترهای مقاومتی در حالت آلوده با فلزات سنگین شده است [۳]. بررسی اثر فلزات سنگین بر روی پارامترهای مقاومتی خاک های رسی توسط نگهدار و همکاران انجام شد. نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی خاکهای آلوده با سرب و روی نشان داد، افزایش غلظت آلاینده سبب کاهش چسبندگی در مخلوط ماسه با ۶۰٪، ۷۵٪ و ۹۰٪ کائولینیت شده است. همچنین با تغییر فلز سنگین از سرب به روی تغییرات محسوسی در زاویه اصطکاک داخلی نمونه ها مشاهده نشده ولیکن تغییرات چسبندگی خاک در حالت آلوده با سرب به مراتب بیشتر از روی است [۴]. اوحدی و همکاران در تحقیقات خود نشان دادند که تئوری لایه دوگانه قادر به توصیف کامل تغییر رفتار خاکهای رسی آلوده نمی باشد و تغییر رفتار بنتونیت توسط پارامترهایی از قبیل ثابت دی الکتریک، لزجت سینماتیکی و اندازه مولکولی کنترل می گردد. همچنین نفوذ فلزات سنگین باعث کاهش قابل توجه در خواص خمیری و افزایش نفوذپذیری خاکهای رسی می شود [۵]. در مطالعات کومار و

آلاینده های فلز سنگین از مهمترین و خطرناکترین آلاینده هایی هستند که مطالعه آنها هم از نظر زیست محیطی و هم از جهت ژئوتکنیکی، حائز اهمیت است. با توجه به گزارشهای سازمان بهداشت جهانی آمریکا غلظت فلزات سنگینی از قبیل سرب (Pb)، روی (Zn) و جیوه (Hg) در خاکهای مناطق کشاورزی و نیز صنعتی به نسبت بیشتری از دیگر عناصر فلز سنگین است [۱]. ورود آلاینده های فلز سنگین به خاک و جذب آن به وسیله بخش ریزدانه رسی، موجب تغییرات ساختاری در خاک آلوده می گردد [۲]. اگر چه حضور ریزدانه های رسی و جذب فلزات سنگین به واسطه این ریزدانه ها، باعث ارتقاء عملکرد خاک از جنبه های زیست محیطی می شود، ولیکن تغییرات ساختاری به وجود آمده در اثر جذب فلزات سنگین لزوم بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاکهای آلوده را نشان می دهد. نتایج تحقیقات

1 United States Environmental Protection Agency

* نویسنده عهده دار مکاتبات: hassanlou@eng.ikiu.ac.ir



درون ساختار ژئولیت به نحوی باشد که عناصر فلز سنگین از آن به راحتی عبور کنند، جذب بیشتری اتفاق خواهد افتاد [۱۷]. با توجه به وجود منابع عظیم ژئولیت در ایران و بهره برداری از این منابع در مناطق مختلف (مانند سمنان)، این منبع میتواند به طور گستردهای در حذف آلاینده های زیست محیطی از جمله فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفته شود [۱۸]. این در حالی می باشد که توانایی ژئولیت در جذب آلودگیهای آلی محدود می باشد [۱۹]. نتایج هانگ و همکاران^۷ نشان میداد پدیده حذف فلزات سنگین در ژئولیت، ارتباط مستقیم با غلظت اولیه آن‌ها در محلول، چگالی بار و شعاع اتمی فلز سنگین دارد. بر همین اساس سرب (Pb^{2+}) با کمترین شعاع اتمی بالاترین جذب و منگنز (Mn^{2+}) با بیشترین شعاع اتمی حداقل جذب را خواهد داشت [۲۰]. پارک^۸ به بررسی تأثیر ژئولیت طبیعی بر روی خاک آلوده با فلز سنگین روی پرداخت. نتایج نشان میداد افزایش درصد ژئولیت در خاک هوازده باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش ظرفیت جذب می شود [۲۱]. بهسازی خاک آلوده به سرب، جیوه و روی با استفاده از آهک در مناطق صنعتی و پالایشگاهی توسط مقال و همکاران^۹ انجام شد. نتایج نشان میداد اگر چه ورود آلودگی باعث کاهش مقاومت می گردد، ولیکن افزودن آهک به خاک آلوده باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت تک محوری می شود. این تغییرات با افزایش دوره عمل‌آوری افزایش قابل توجهی می یابد [۲۲]. در مناطق آلوده صنعتی، روشهای الکتروکینتیک علاوه بر حذف آلودگی باعث افزایش مقاومت نیز می شوند. در تحقیقات زانک^{۱۰}، بهسازی سایتی آلوده در منطقهای از چین با استفاده از روشهای الکتروکینتیک در ولتاژهای مختلف بررسی گردید. نتایج نشان دهنده تغییرات قابل ملاحظهای در غلظت سرب بعد و قبل از اعمال ولتاژهای مختلف می باشد. مطابق نتایج به دست آمده، غلظت هر پنج فلز سنگین سرب، روی، کروم، کادمیم و مس به طور محسوسی کاهش یافت [۲۳].

در این تحقیق از ترکیب ماسه با ۱۵٪ کائولینیت به عنوان خاک پایه استفاده می شود. دلایل انتخاب درصد کائولینیت مورد نظر در خاک پایه، وجود درصدهای مشابه یا نزدیک به آن در اکثر کارهای تحقیقاتی در زمینه آلودگی با فلزات سنگین می باشد [۹-۱۰]، علاوه بر آن با توجه به عدم تراکمپذیری ماسه، استفاده از ریزدانه های رسی در آن امری ضروری است. هدف اصلی از این تحقیق افزایش ظرفیت جذب خاک پایه با اضافه کردن

سربواستوا، تأثیر اکسید سرب (Pb_2O_4) روی خواص ژئوتکنیکی خاک رس ماسهدار بررسی شد. مطابق نتایج حاصله، افزایش آلودگی باعث کاهش میزان چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی شد [۶]. موس سالیب و بودت^۲ در تحقیقات خود اشاره به عملکرد متضاد حضور کاتیون‌های فلزات سنگین در خاکهای کائولینیت و الیت در مقایسه با خاک بنتونیت کردند. مطابق نتایج، حضور آلاینده های فلزات سنگین در خاکهای بنتونیت دار باعث کاهش خاصیت خمیری شده و این در حالی است که افزایش غلظت آلاینده باعث افزایش خاصیت خمیری در کائولینیت گردید [۷]. بر طبق تحقیقات ژانگ و همکاران^۳ مقاومت تک محوری برای نمونه های خاک رس متورم شونده در حالت آلوده با غلظتهای ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ppm نیترات سرب و روی نشان میداد، افزایش غلظت فلزات سنگین باعث کاهش مقاومت تک محوری شده است. همچنین مقاومت تک محوری در حالت آلوده با سرب نسبت به روی بیشتر است [۸]. چو و همکاران^۴ به بررسی پارامترهای مقاومت برشی در خاکهای آلوده با فلزات سنگین سرب، روی و کادمیم پرداختند. آزمایش برش مستقیم بعد از عمل‌آوری نمونههای آلوده انجام شد. مطابق نتایج افزایش غلظت فلزات سنگین باعث افزایش مقاومت برشی و چسبندگی در خاک شد. همچنین افزایش غلظت آلاینده ها تأثیر معکوس با مقاومت الکتریکی نمونه های آلوده دارد [۹]. لی و همکاران^۵ به بررسی رفتار خاکهای آلوده با سرب پرداختند. نتایج نشان داد، افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین باعث کاهش ضخامت آب لایه دوگانه^۶ شده و همین امر باعث افزایش ساختار فلوکولهای گردید [۱۰]. با توجه به ظرفیت محدود برخی خاکها در جذب آلاینده ها، استفاده از جاذبهای فلزات سنگین در خاکها گسترش یافته است. ژئولیت با توجه به سطح جانبی و قدرت تبادل کاتیونی بالا، یکی از جاذبهای اقتصادی می باشد. خصوصیات خمیری برخی از ژئولیتها تا حدودی نزدیک به کائولینیت می باشد [۱۳]. ژئولیتها معمولاً دارای ساختاری کریستالی، متخلخل و سه بعدی می باشند و به دلیل داشتن خصوصیات تبادل یونی، باعث اصلاح خاک می گردند [۱۴-۱۵]. تعداد کانالها و ترتیب قرار گرفتن آنها، تعیین کننده خاصیت جابجایی کاتیونی در ژئولیت می باشد. همچنین جذب فلزات سنگین، وابسته به اندازه یون و ابعاد کانالهای ژئولیت است [۱۶]. چنانچه اندازه کانالهای

- 1 Srivastava and Kumar.
- 2 Muththalib and Baudet.
- 3 Zheng et al.
- 4 Chu et al.
- 5 Li et al.
- 6 Diffuse double layer

- 7 Hong et al.
- 8 Park
- 9 Moghal et al.
- 10 Zang

جدول ۱. مشخصات ماسه مصرفی

Table 1. Physical properties of sand

| Specific Gravity, G_s | Min Void ratio, e_{min} | Max Void ratio, e_{max} | Uniformity Coefficient, C_u | mean grain size, $D_{50}(mm)$ | Classification (USCS) |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| ۲/۶۸ | ۰/۵۹ | ۰/۹۱ | ۱/۹ | ۰/۲ | SP |

جدول ۲. مشخصات ریزدانه مصرفی

Table 2. Physical properties of fine grained particle

| Soil | Specific Gravity, G_s | LL (%) | PL (%) | PI (%) | Classification (USCS) |
|-----------|-------------------------|--------|--------|--------|-----------------------|
| Kaolinite | ۲/۵۹ | ۴۸/۸ | ۳۱/۵ | ۱۷/۳ | CL |
| Bentonite | ۲/۶۱ | ۱۳۵/۵ | ۵۱/۹ | ۸۳/۶ | CH |
| Zeolite | ۲/۵۸ | ۴۰/۹ | ۲۹/۸ | ۱۱/۱ | CL |

جدول ۳. ظرفیت تبادل کاتیونی برای ریزدانه های مختلف

Table 3. Cation exchange capacity of fine grained

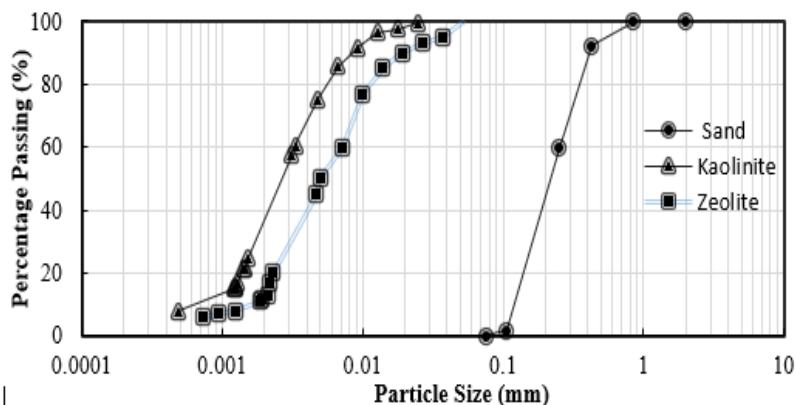
| Soil | Exchangeable (meq/100g) Cation | | | | CEC (meq/100g) |
|-----------|--------------------------------|-----------|-------|--------|----------------|
| | Ca^{2+} | Mg^{2+} | K^+ | Na^+ | |
| Kaolinite | ۳۳/۵ | ۶/۶۶ | ۸/۲۰ | ۲/۳۹ | ۵۰/۷۵ |
| Bentonite | ۳۱/۵ | ۶۰/۸۳ | ۱۰/۵۱ | ۱۰۲/۱۷ | ۲۰۵/۰۱ |
| Zeolite | ۶۶ | ۱۹/۱۶ | ۲۲/۳۰ | ۶۴/۳۴ | ۱۷۱/۸ |

استفاده شده است.

۲- مواد مصرفی و روش تحقیق

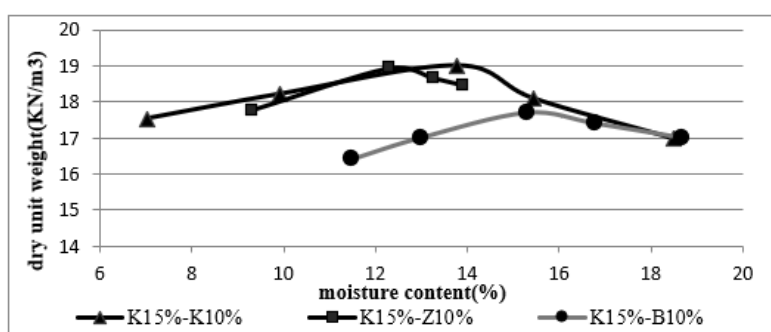
همان طور که بیان گردید در این تحقیق از ترکیب ماسه و ۱۵٪ کائولینیت برای ساخت نمونه های خاک پایه استفاده شد. همچنین به منظور بهبود عملکرد جذب فلزات سنگین در ترکیب خاک پایه، از سه نوع جاذب با خصوصیات خمیری کم (زئولیت و کائولینیت) و خصوصیات خمیری زیاد (بنتونیت) استفاده شده است [۲۴]. در جدولهای ۱ و ۲ مشخصات خاکهای مصرفی و همچنین در جدول شماره ۳ کاتیونهای آزاد و ظرفیت تبادل کاتیونی آنها نشان داده شده است. کائولینیت، زئولیت و بنتونیت مصرفی به ترتیب از محصولات شرکت خاک چینی ایران، نگین سمنان و ایران باریت

جاذبه های مختلف خمیری و غیرخمیری و بررسی تغییرات رفتار ترکیب خاک- جاذب در دو حالت آلوده و غیرآلوده می باشد. یکی دیگر از اهداف این تحقیق تأثیر خاصیت خمیری جاذب و بررسی تغییرات ریزساختاری در کانیهای مختلف رسی در حالت آلوده با فلزات سنگین است. برای این منظور از سه نوع جاذب زئولیت و کائولینیت با خصوصیات خمیری کم و بنتونیت با خاصیت خمیری زیاد به عنوان جاذب استفاده شد. اگر چه در بسیاری از تحقیقات از ترکیبات کائولینیت دار در خاکهای آلوده استفاده شده است [۱۰]، ولیکن قابلیت جذب آنها در مقایسه با بنتونیت و زئولیت کمتر می باشد. بنابراین به دلیل گستردگی کائولینیت در بسترهای طبیعی از یک سو و از سوی دیگر به منظور مقایسه پارامترهای مقاومتی و مقاومت نهایی در دو حالت آلوده و غیرآلوده با ترکیب بنتونیت دار، از کائولینیت نیز به عنوان جاذب



شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح مصرفی

Fig. 1. Particle size distribution curve



شکل ۲. تغییرات دانسیته ماکزیمم در مقابل رطوبت بهینه برای ترکیبات مختلف خاک پایه و جاذب های مختلف

Fig. 2. The changes of maximum dry density and optimum water content in base composition with different adsorbent

بهینه برای ساخت نمونه های آلوده و غیرآلوده یکسان می باشد و صرفاً آب مورد نظر برای ساخت نمونه های آلوده حاوی نمک حل شده نیترات سرب می باشد. به بیان دیگر ابتدا درصد رطوبت بهینه تعیین گردیده است و سپس متناظر با آن مقدار آلودگی اضافه شده است. با توجه به روش اختلاط سطحی جاذب با خاک، تراکم نمونه ها ۹۵٪ تراکم بهینه می باشد. نمونه سازی به روش تراکم مرطوب انجام شد. در شکل ۲ تغییرات دانسیته خشک در مقابل درصد رطوبت برای ترکیبات مختلف نشان داده شده است. به منظور جذب فلز سنگین، نمونه ها پس از ساخت، به مدت ۷ روز در کیسه پلاستیکی دربسته و در دمای اتاق نگهداری شده اند. کلیه نمونه ها در پنج لایه با ارتفاع و وزن مساوی ساخته شد. پس از آماده شدن نمونه ها (به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی متر)، آزمایشهای سه محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده انجام گردید. ابتدا به مدت ۶۰ دقیقه گاز CO_2 با نرخ یک حباب در ثانیه از درون

بوده و ماسه مصرفی نیز ماسه ۱۶۱ فیروزکوه می باشد. در شکل شماره ۱ نمودار دانه بندی مصالح مصرفی نشان داده شده است. زئولیت ها حاوی تعدادی زیادی کاتیون های قابل تعادلی از گروه فلزات قلیایی و قلیایی خاکی (Ca^{+2} و Mg^{+2} ، K^+ ، Na^+) می باشند [۲۵]. یکی دیگر از جاذب های مورد مطالعه در این تحقیق بنتونیت می باشد، که پیوند غالب بین ذرات مونت موریلونیت بنتونیت از نوع واندروالسی بوده و با توجه به خاصیت خمیری بالا، آب لایه مضاعف عاملی تأثیرگذار در رفتار آن می باشد [۱۲]. به منظور بررسی اثر جاذب های مختلف، از هر کدام از جاذبها ۱۰٪ به ترکیب خاک پایه اضافه شد. جهت ساخت نمونه های آلوده با فلزات سنگین، غلظت های مختلف نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) به خاک اضافه شد. در همین راستا ابتدا نیترات سرب به مقدار مناسب با آب حل شده و محلولهایی با غلظت های ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm تهیه و با خاک ترکیب گردید. در این پژوهش درصد رطوبت



شکل ۳. تصویری از دستگاه سه محوری استاتیکی و نمونه سازی انجام شده در آزمایش

Fig. 3. Triaxial testing machine and sample preparation

تحت تنش همه جانبه 100 kPa و در حالت آلوده با غلظت 10000 ppm نیترات سرب می باشد.

۴- نتایج

۴-۱- مقایسه عملکرد جاذب زئولیت و بنتونیت

در شکل ۴ تغییرات مقاومت نهایی برای ترکیب خاک پایه با 10% از جاذبهای بنتونیت و زئولیت تحت تنشهای همه جانبه مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که به طور متوسط در تنشهای همه جانبه مختلف، با تغییر نوع جاذب از زئولیت به بنتونیت، مقدار مقاومت نهایی در حدود 68% کاهش می یابد. با افزایش غلظت نیترات سرب، مقاومت نهایی برای ترکیب زئولیتدار کاهش یافته و در ترکیب بنتونیتدار افزایش می یابد، به طوری که در ترکیب خاک پایه با 10% زئولیت در حالت آلوده با 10000 ppm نیترات سرب، با تغییر کانی جاذب از زئولیت به بنتونیت، اختلاف بین مقاومتهای نهایی به حدود 40% کاهش می یابد. همچنین در حالت آلوده با غلظت 20000 ppm ، مقاومت نهایی در ترکیب خاک پایه با 10% بنتونیت در حدود 17% نسبت به ترکیب خاک پایه با 10% زئولیت در تنشهای همه جانبه مختلف کاهش یافته است. افزایش مقاومت نهایی در ترکیب خاک پایه بنتونیتدار به دلیل کاهش ضخامت آب لایه مضاعف بنتونیت و غالب بودن رفتار آن بر تغییر ساختار کائولینیت موجود در ترکیب می باشد. همچنین تغییر رفتار بنتونیت آلوده با فلزات سنگین مشابه تغییرات آن در مطالعات طاهری و همکاران^۱ می باشد [۲۶].

تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز در شکل ۵ برای دو

نمونه عبور داده شده و پس از جایگزینی هوای داخل نمونه با گاز CO_2 ، آب هواگیری شده وارد نمونه گردید. زمان اشباع سازی با توجه به متغیر بودن نوع کانی رسی متفاوت است. به منظور یکسان سازی شرایط آزمایش، پس از عبور آب تمامی نمونه ها تا پسفشار 200 kPa به درجه اشباع بالای 95% رسیده و سپس آزمایش سه محوری بر روی نمونه ها انجام گردید. لازم به ذکر می باشد، مطابق شکل ۳ نمونه سازی و آزمایشهای انجام شده با دستگاه سه محوری استاتیکی در دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) انجام شده است.

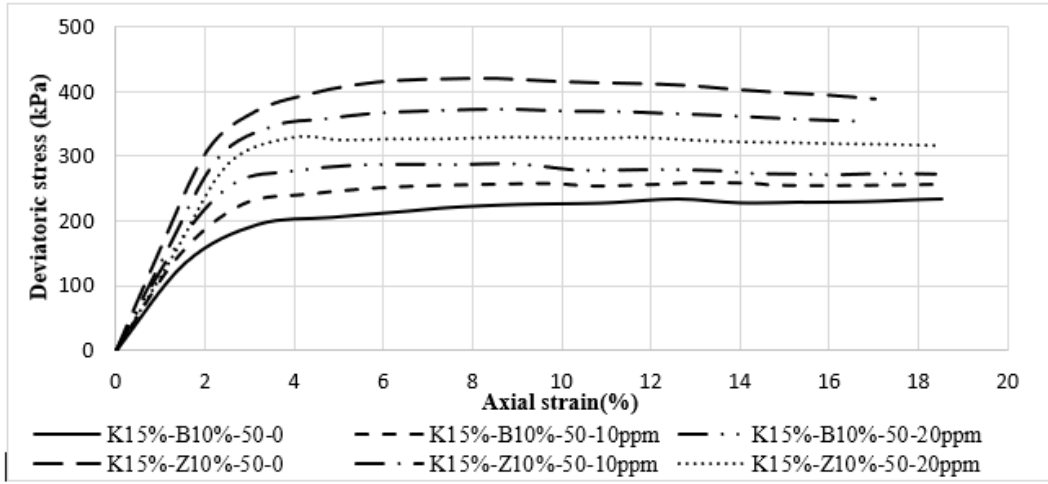
۳- آزمایشهای انجام شده

با توجه به جدول ۴ تعداد ۲۷ آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده بر روی مخلوط خاک پایه با 10% از جاذبهای مختلف در دو حالت غیرآلوده و آلوده انجام گردید. متغیرهای مورد مطالعه نوع جاذب (کائولینیت، زئولیت و بنتونیت)، غلظت نیترات سرب و تنش همه جانبه می باشد. نام گذاری آزمایشها با توجه به متغیرهای عنوان شده صورت گرفته است. با توجه به ثابت بودن درصد کائولینیت در خاک پایه، حرف اول همه نمونهها با عبارت K شروع شده و عدد اول نیز ثابت بوده و نشان دهنده درصد کائولینیت (15%) می باشد. به منظور نشان دادن نوع جاذب مورد نظر از عبارات K ، Z و B که به ترتیب نشان دهنده کائولینیت، زئولیت و یا بنتونیت می باشند، استفاده شده و عدد بعد از آن نشان دهنده درصد جاذب (10%) است. اعداد بعدی نیز نشان دهنده مقدار تنش همه جانبه برحسب کیلوپاسکال و غلظت نیترات سرب برحسب ppm می باشد. به عنوان مثال $10-10000-B-15\%K$ نشان دهنده ترکیب خاک پایه با 10% بنتونیت

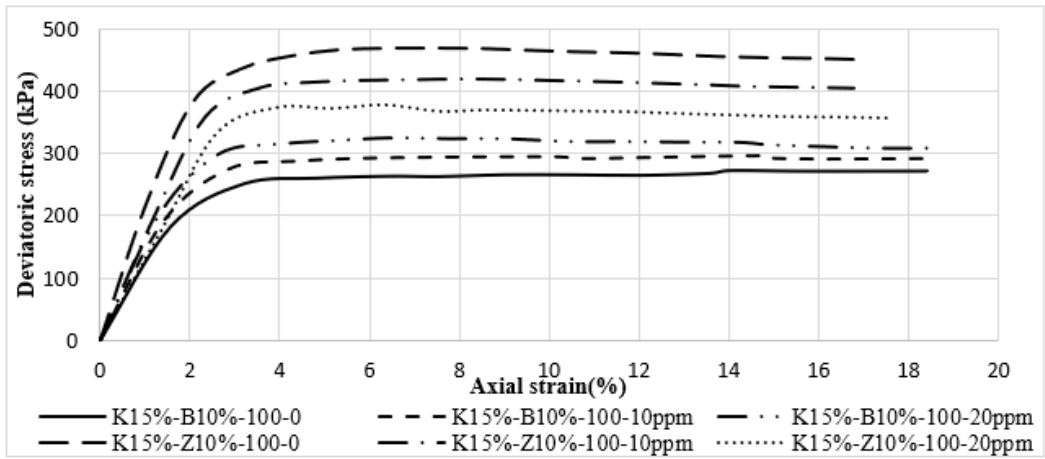
جدول ۴. مشخصات آزمایش های سه محوری انجام شده

Table 4. Abbreviation and number of triaxial tests

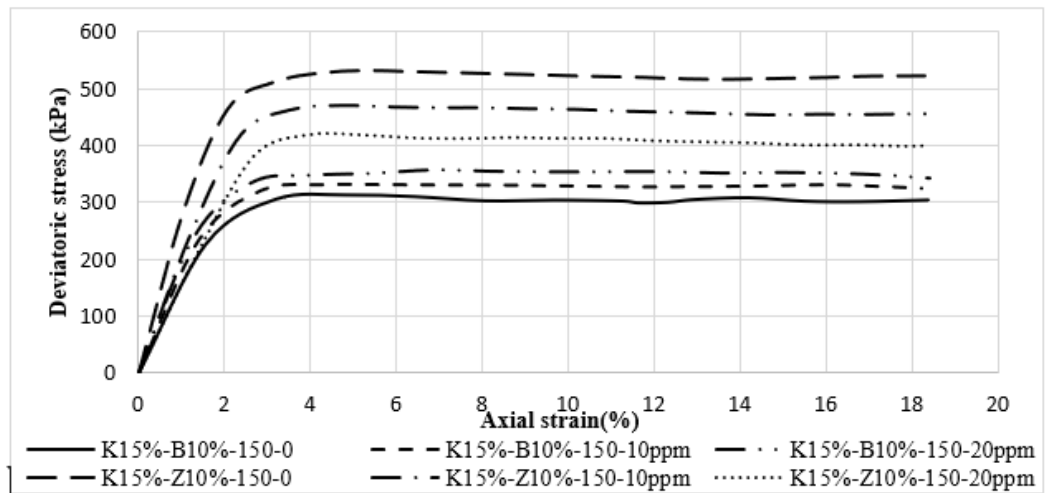
| ردیف | تنش همه جانبه (kPa) | غلظت (ppm) | درصد زئولیت | درصد کائولینیت | درصد بنتونیت | نام نمونه |
|------|---------------------|------------|-------------|----------------|--------------|---------------------|
| 1 | | 0 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-50-0 |
| 2 | 50 | 10000 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-50-10ppm |
| 3 | | 20000 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-50-20ppm |
| 4 | | 0 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-100-0 |
| 5 | 100 | 10000 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-100-10ppm |
| 6 | | 20000 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-100-20ppm |
| 7 | | 0 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-150-0 |
| 8 | 150 | 10000 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-150-10ppm |
| 9 | | 20000 | 10 | 15 | - | K15%-Z10%-150-20ppm |
| 10 | | 0 | - | 25 | - | K15%-K10%-50-0 |
| 11 | 50 | 10000 | - | 25 | - | K15%-K10%-50-10ppm |
| 12 | | 20000 | - | 25 | - | K15%-K10%-50-20ppm |
| 13 | | 0 | - | 25 | - | K15%-K10%-100-0 |
| 14 | 100 | 10000 | - | 25 | - | K15%-K10%-100-10ppm |
| 15 | | 20000 | - | 25 | - | K15%-K10%-100-20ppm |
| 16 | | 0 | - | 25 | - | K15%-K10%-150-0 |
| 17 | 150 | 10000 | - | 25 | - | K15%-K10%-150-10ppm |
| 18 | | 20000 | - | 25 | - | K15%-K10%-150-20ppm |
| 19 | | 0 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-50-0 |
| 20 | 50 | 10000 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-50-10ppm |
| 21 | | 20000 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-50-20ppm |
| 22 | | 0 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-100-0 |
| 23 | 100 | 10000 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-100-10ppm |
| 24 | | 20000 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-100-20ppm |
| 25 | | 0 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-150-0 |
| 26 | 150 | 10000 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-150-10ppm |
| 27 | | 20000 | - | 15 | 10 | K15%-B10%-150-20ppm |



(الف)



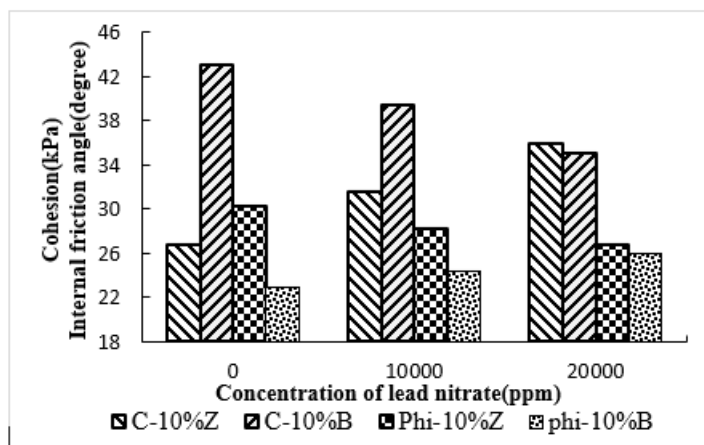
(ب)



(پ)

شکل ۴. تغییرات تنش-کرنش برای نمونه های خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های زئولیت و بنتونیت در حالات آلوده شده و نشده در تنش همه جانبه (الف) ۵۰ kPa، (ب) ۱۰۰ kPa و (پ) ۱۵۰ kPa

Fig. 4. Stress-strain behavior for base composition with 10% zeolite and bentonite adsorbent in two cases of contaminated an uncontaminated at different confining pressure of (a)50 KPa, (b)100 KPa and (c)150 Kpa

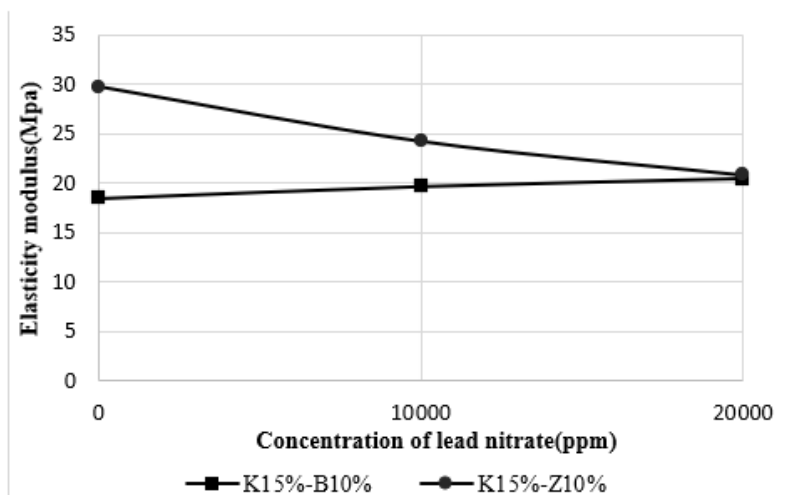


شکل ۵. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه های خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های ژئولیت و بنتونیت

Fig. 5. The changes in the internal friction angel and cohesion for base composition with 10% zeolite and bentonite

میزان چسبندگی می شود. تغییرات مدول الاستیسیته که نشان دهنده شیب اولیه (E_0) در نمودارهای تنش-کرنش می باشد، در شکل ۶ نشان داده شد. مدول الاستیسیته ترکیب خاک پایه با ژئولیت در حالت غیرآلوده در حدود $29/7 \text{ MPa}$ می باشد که با ورود 10000 ppm نیترات سرب به این ترکیب مدول الاستیسیته در حدود 18% کاهش یافته و به $24/2 \text{ Mpa}$ رسیده است. همچنین با تغییر جاذب از ژئولیت به بنتونیت مقدار مدول الاستیسیته در حالت غیرآلوده در حدود 38% نسبت به ترکیب ژئولیتدار کاهش می یابد. این در حالی می باشد که با ورود 10000 ppm نیترات سرب به ترکیب بنتونیت دار، مدول الاستیسیته در حدود 6% نسبت به حالت غیرآلوده افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد در غلظت ثابت 10000 ppm مقدار مدول الاستیسیته در ترکیب ژئولیتدار در حدود 20% نسبت به ترکیب بنتونیتدار بیشتر بوده و این در حالی می باشد که در غلظت 20000 ppm اختلاف مدول الاستیسیته بین دو ترکیب ژئولیت دار و بنتونیت دار به 2% می رسد. به طور خلاصه میتوان گفت با جایگزینی بنتونیت به جای ژئولیت در ترکیب خاک پایه (در حالت غیر آلوده)، از نظر ژئوتکنیکی مقاومت خاک کاهش محسوسی می یابد و این در حالی می باشد ظرفیت جذب و تبادل کاتیونی هر دو ریزدانه بالا می باشد. بنابراین می توان گفت ترکیب خاک پایه با 10% ژئولیت از هم از نظر ژئوتکنیکی و هم از نظر زیست محیطی ترکیب مناسب برای بستر زیر مخازن ذخیره فلزات سنگین می باشد.

نوع جاذب ژئولیت و بنتونیت نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد، در حالت غیرآلوده، اختلاف بین چسبندگی ترکیب 10% ژئولیت و بنتونیت در حدود 37% می باشد که با ورود نیترات سرب با غلظت 10000 ppm و افزایش چسبندگی در ترکیب ژئولیت دار و کاهش آن در ترکیب بنتونیت دار، اختلاف بین مقادیر به 20% کاهش می یابد. افزایش بیشتر غلظت نیترات سرب به 20000 ppm سبب می گردد که چسبندگی نهایی بین دو ترکیب به هم نزدیک شده و اختلاف آن ها به حدود 2% درصد برسد. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نیز برای ترکیب دو نوع جاذب با خصوصیات خمیری کم و زیاد، با افزایش غلظت نیترات سرب به یکدیگر نزدیک تر می گردد. به طوری که اختلاف بین زاویه اصطکاک ترکیب ژئولیت و بنتونیت در حالت غیرآلوده در حدود 25% می باشد که با ورود نیترات سرب با غلظت حداکثری، درصد اختلاف بین دو ترکیب به 3% کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد، اگر چه در حالت غیرآلوده اختلاف بین مقاومت نهایی و یا پارامترهای مقاومتی بین دو ترکیب خاک پایه با 10% ژئولیت و 10% بنتونیت زیاد می باشد، ولیکن با افزایش غلظت فلزات سنگین و کاهش مقاومت ترکیب ژئولیتدار از یک سو و افزایش مقاومت ترکیب بنتونیت دار از سوی دیگر، مقاومت نهایی دو ترکیب به یکدیگر نزدیک می شوند. در ترکیبات بنتونیت دار با توجه به کاهش ضخامت آب لایه مضاعف [۱۲] و تشکیل ساختار فلوکولهای در بنتونیت علاوه بر افزایش مقاومت نهایی مقدار زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. در ترکیبات ژئولیت دار، تبادل کاتیونی انجام شده سبب تغییر ریزساختار از حالت فلوکولهای به پراکنده و افزایش



شکل ۶. تغییرات مدول الاستیسیته برای نمونه های خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های زئولیت و بنتونیت

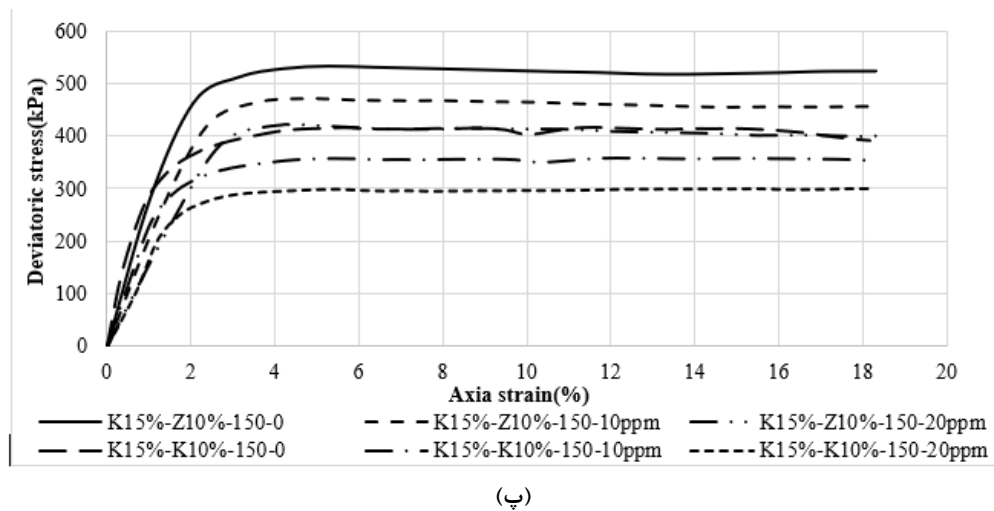
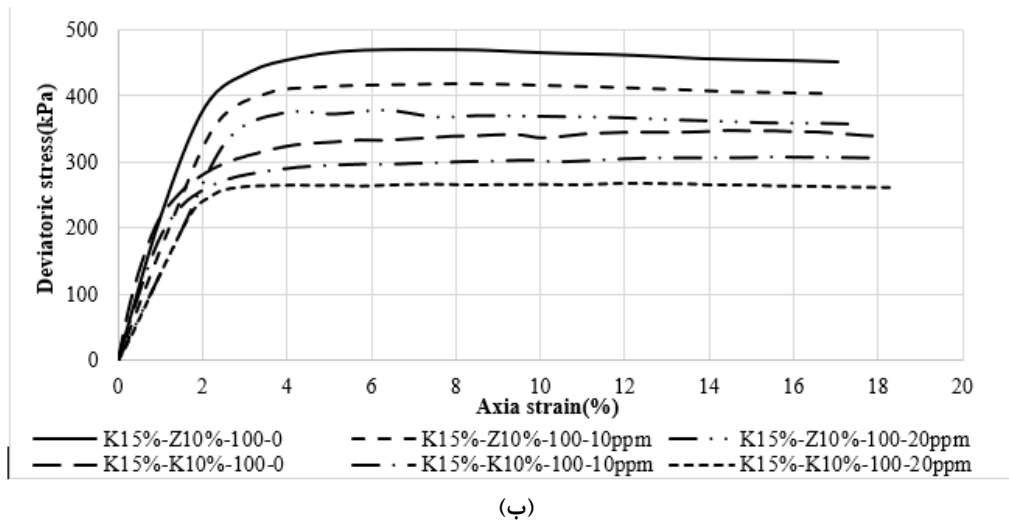
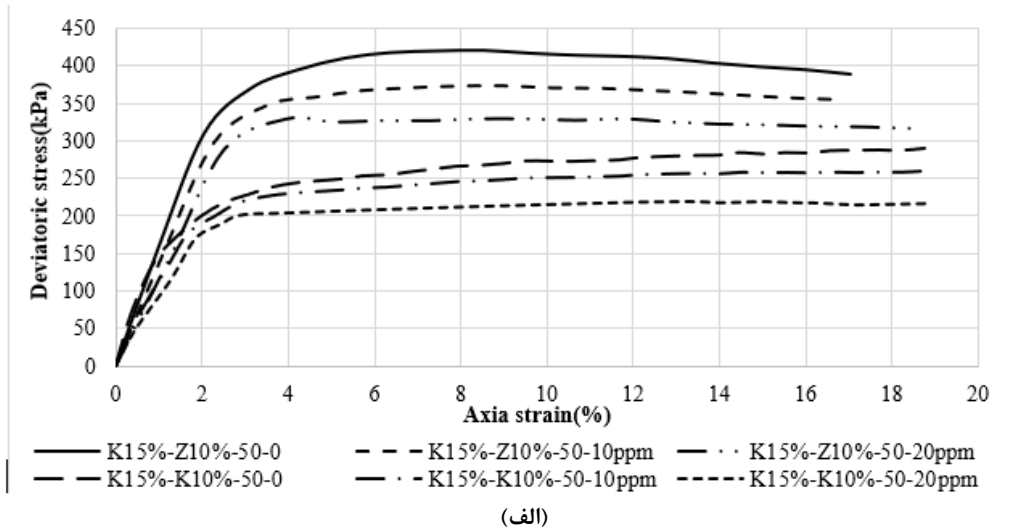
Fig. 6. The changes in the elasticity modulus for base composition with 10% zeolite and bentonite

تغییرات کاهشی در مقاومت نهایی بین دو حالت آلوده شده و غیرآلوده در حدود ۲۱٪ می باشد.

تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر برای ترکیب خاک پایه با هر دو نوع جاذب زئولیت و کائولینیت در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در حالت غیرآلوده با تغییر جاذب از کائولینیت به زئولیت به ترتیب در حدود ۱۱٪ و ۸٪ افزایش می یابد. با ورود آلاینده فلزات سنگین روند تغییر چسبندگی در ترکیب کائولینیتدار بیشتر از ترکیب زئولیت دار می باشد. یکی از دلایل این امر تأثیرپذیری کمتر ساختار زئولیت در اثر جذب فلزات سنگین است [۲۰]. با توجه به پایداری بیشتر زئولیت نسبت به کائولینیت [۲۰]، تأثیر آلودگی بر روی پارامترهای مقاومتی خاک زئولیت دار به مراتب کمتر از ترکیب خاک پایه با کائولینیت می باشد. به طور مثال با ورود آلودگی به غلظت ۲۰۰۰۰ ppm چسبندگی ترکیب خاک پایه با ۱۰٪ زئولیت در حدود ۵٪ نسبت به ترکیب خاک پایه با ۱۰٪ کائولینیت کاهش یافته است. همچنین در این حالت زاویه اصطکاک داخلی نیز بین دو ترکیب در حدود ۱۴٪ اختلاف دارد. افزایش درصد اختلاف در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بین دو ترکیب زئولیت دار و کائولینیت دار، با تغییر فاز از حالت غیرآلوده به آلوده، نشان دهنده این امر می باشد که زئولیت اگر چه مقدار بیشتری از فلزات سنگین را جذب می کند ولیکن

۴-۲- مقایسه عملکرد جاذب زئولیت و کائولینیت

با توجه به اینکه زئولیت و کائولینیت هر دو جز خاکهایی با خاصیت خمیری کم دستهبندی می شوند، مکانیزم رفتاری آنها در حالت آلوده با فلزات سنگین تقریباً مشابه یکدیگر می باشد. نتایج مقاومت نهایی برای ترکیب خاک پایه با ۱۰٪ زئولیت و کائولینیت در تنشهای همه جانبه مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که به طور متوسط در تنشهای همه جانبه مختلف در حالت غیرآلوده با تغییر جاذب از کائولینیت به زئولیت، مقاومت نهایی در حدود ۲۶٪ افزایش می یابد. با افزایش غلظت نیترات سرب در آب منفذی به ۱۰۰۰۰ ppm، اختلاف مقاومت نهایی بین دو نوع جاذب در حدود ۳۴٪ است. افزایش بیشتر غلظت نیترات سرب به ۲۰۰۰۰ ppm سبب می شود که مقاومت نهایی با تغییر جاذب در خاک پایه از کائولینیت به زئولیت در حدود ۳۸٪ افزایش یابد. همان طور که ملاحظه می گردد با افزایش غلظت نیترات سرب مقاومت نهایی در ترکیب کائولینیت دار با درصد بیشتری نسبت به ترکیب زئولیت دار کاهش می یابد، که همین امر باعث افزایش اختلاف بین مقاومت نهایی این دو ترکیب با تغییر فاز از حالت غیرآلوده به آلوده می شود. به طور کلی می توان گفت که در ترکیب خاک پایه با ۱۰٪ زئولیت، مقاومت نهایی در حالت آلوده شده با غلظت ۱۰۰۰۰ ppm، به طور متوسط در حدود ۱۱٪ نسبت به حالت غیرآلوده کاهش می یابد. همچنین با افزایش غلظت نیترات سرب به ۲۰۰۰۰ ppm



شکل ۷. تغییرات تنش-کرنش برای نمونه های خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های زئولیت و کائولینیت در حالات آلوده شده و نشده در تنش همه جانبه (الف) ۵۰ kPa، (ب) ۱۰۰ kPa و (پ) ۱۵۰ kPa

Fig. 7. Stress-strain behavior for base composition with 10% zeolite and kaolinite adsorbent in two cases of contaminated an uncontaminated at different confining pressure of (a)50 KPa, (b)100 KPa and (c)150 Kpa

می باشد، ولیکن مطابق جدول ۳ تبادل کاتیونی و یا به عبارت بهتر قابلیت جذب ژئولیت بیشتر از کائولینیت می باشد. بنابراین با تغییر نوع جاذب از کائولینیت به ژئولیت، علاوه بر اینکه مقاومت در هر دو حالت آلوده و غیر آلوده افزایش می یابد، ظرفیت جذب نیز افزایش می یابد، پس برخلاف قسمت قبل که نشان میداد از نظر ژئوتکنیکی ترکیبات بنتونیتدار و ژئولیتدار در حالت آلوده در خلاف جهت یکدیگر عمل می کنند، در این بخش می توان گفت، جایگزینی ژئولیت به جای کائولینیت در ترکیب خاک پایه، علاوه بر افزایش عملکرد زیست محیطی خاک، کارایی ژئوتکنیکی را نیز در هر دو حالت آلوده و غیر آلوده افزایش می دهد.

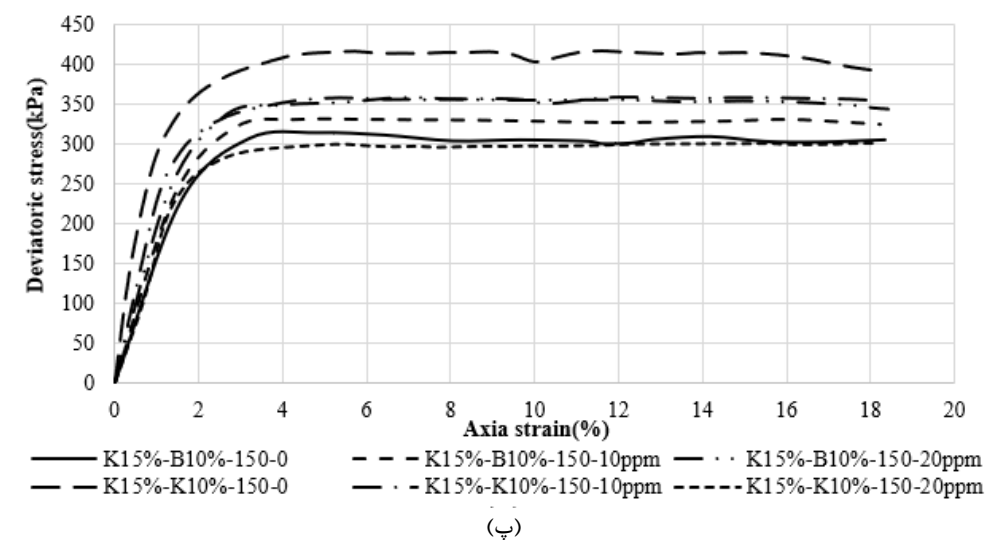
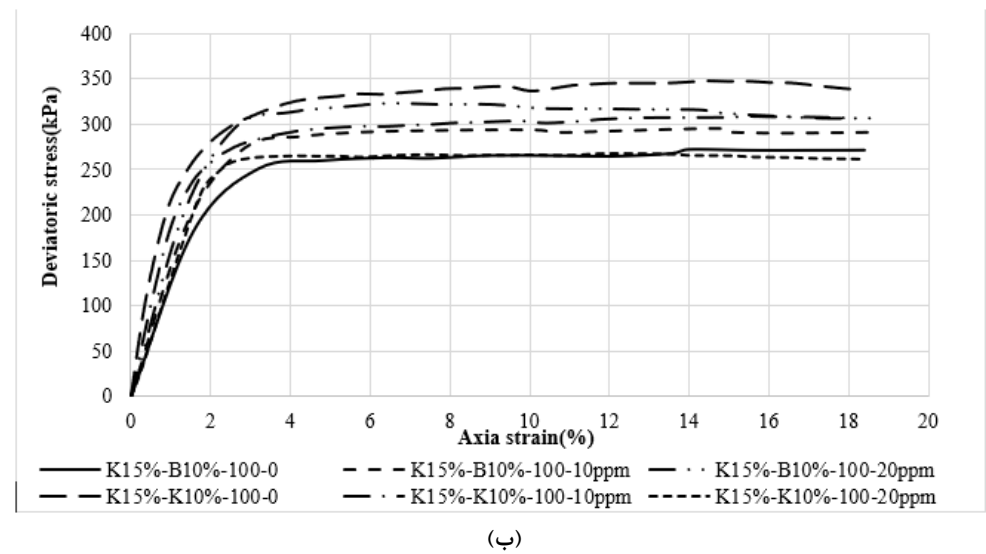
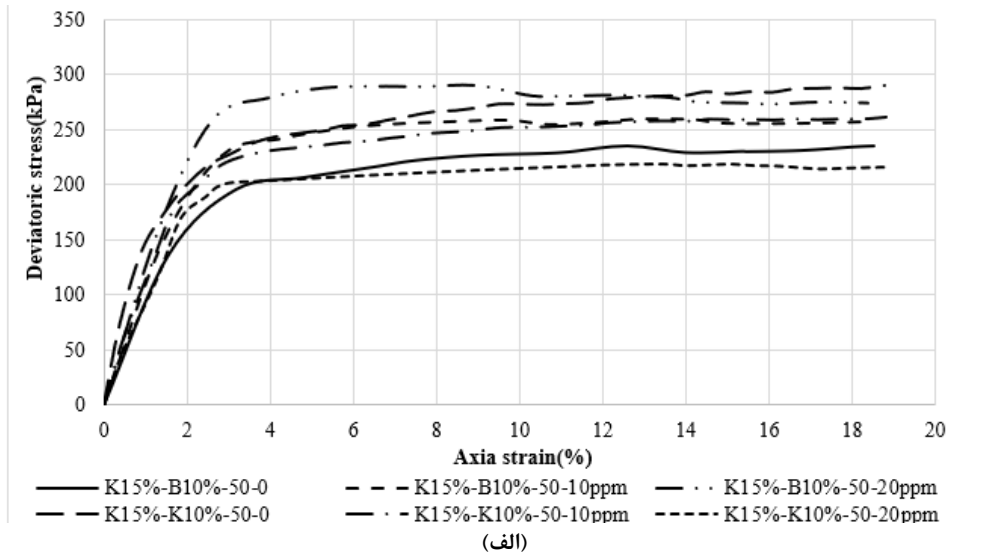
۴-۳- مقایسه عملکرد جاذب بنتونیت و کائولینیت

بر اساس شکل ۱۰ می توان گفت مقاومت نهایی به طور متوسط در تنشهای همه جانبه مختلف در حالت غیر آلوده در ترکیب خاک پایه با ۱۰٪ کائولینیت، در حدود ۲۰٪ نسبت به ترکیب خاک پایه بنتونیت دار افزایش می یابد. نتایج در حالت آلوده نشان می دهد که ورود فلزات سنگین در ترکیبات کائولینیتدار باعث کاهش و در ترکیبات بنتونیتدار سبب افزایش مقاومت نهایی خاک می گردد. به عنوان نمونه در تنش همه جانبه ۱۵۰ kPa و آلوده با غلظت ۱۰۰۰۰ ppm نترات سرب، مقاومت نهایی در ترکیب خاک پایه با کائولینیت در حدود ۲۵۰ kPa می باشد، این در حالی است که با تغییر جاذب به بنتونیت در خاک پایه، مقاومت نهایی به ۲۵۲ kPa میرسد. بنابراین در حالت آلوده با غلظت ۱۰۰۰۰ ppm اختلاف نتایج زیر ۱٪ می باشد. با افزایش غلظت نترات سرب به ۲۰۰۰۰ ppm، افزایش مقاومت در ترکیب بنتونیتدار بیشتر از کاهش مقاومت در ترکیب کائولینیت دار بوده و لذا در این حالت مقاومت ترکیب خاک پایه با بنتونیت بیشتر از ترکیب کائولینیت دار می باشد. نتایج نشان می دهد در این غلظت، مقاومت نهایی در ترکیب با جاذب کائولینیت در حدود ۲۲٪ نسبت به ترکیب بنتونیتدار کمتر می باشد. در کائولینیتها (رس با خاصیت خمیری کم) پیوند بین کانیها در اثر جذب آلودگی ضعیف شده و همین امر باعث کاهش جاذبه بین کانیها گردیده است. در اثر ورود آلودگی در کائولینیت ساختار از فلوکولهای به پراکنده تبدیل شده و لذا مقاومت خاک آلوده کاهش یافته است. همان طور که ملاحظه می گردد تأثیر آلودگی بر روی بنتونیت و کائولینیت عکس جهت یکدیگر می باشد، ولیکن در ترکیب خاک پایه با بنتونیت، به دلیل جذب بالای بنتونیت نسبت به کائولینیت، عملکرد بنتونیت غالب بوده و لذا مقاومت نهایی افزایش می یابد. تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای ترکیب خاک پایه

با ۱۰٪ کائولینیت و بنتونیت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در حالت غیر آلوده با تغییر جاذب از کائولینیت به بنتونیت، مقدار چسبندگی در حدود ۸۰٪ افزایش و مقدار زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۲۰٪ کاهش می یابد. با ورود آلاینده سرب، چسبندگی در ترکیب بنتونیتدار کاهش و در ترکیب کائولینیت دار افزایش یافته است، همین امر باعث شده تا اختلاف چسبندگی در ۱۰۰۰۰ ppm از ۸۰٪ در حالت غیر آلوده به ۲۳٪ تغییر یابد. زاویه اصطکاک داخلی نیز در این غلظت با تغییر کائولینیت به بنتونیت در حدود ۸٪ کاهش می یابد. افزایش بیشتر غلظت نترات سرب به ppm ۲۰۰۰۰ سبب می گردد که چسبندگی ترکیب کائولینیت دار در حدود ۷٪ بیشتر از ترکیب بنتونیت دار شود. تغییر غلظت از ۱۰۰۰۰ به ppm ۲۰۰۰۰، تأثیر قابل توجهی بر روی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در ترکیب با جاذب بنتونیت میگذارد و باعث افزایش آن نسبت به ترکیب کائولینیتدار می شود. مطابق نتایج در غلظت ppm ۲۰۰۰۰ زاویه اصطکاک داخلی ترکیب بنتونیتدار در حدود ۹٪ نسبت به ترکیب با جاذب کائولینیت افزایش یافته است. اگر چه در حالت آلوده با غلظت ppm ۲۰۰۰۰ میزان چسبندگی در ترکیب با جاذب بنتونیت در حدود ۷٪ کمتر از حالت کائولینیتدار می باشد ولیکن با توجه به تأثیر بیشتر زاویه اصطکاک داخلی بر روی مقاومت نهایی و افزایش ۹٪ درصدی آن در ترکیب بنتونیت دار نسبت به کائولینیت دار، مقاومت نهایی در حالت آلوده با غلظت حداکثری در ترکیب خاک پایه با جاذب بنتونیت مقدار بیشتری را نسبت به جاذب کائولینیت نشان می دهد. تغییرات مدول الاستیسیته نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مدول الاستیسیته برای ترکیب با جاذب کائولینیت دار در حالت غیر آلوده در حدود ۲۶/۶ MPa بوده که با تغییر در جاذب به بنتونیت مقدار مدول الاستیسیته در حدود ۳۰٪ کاهش می یابد. با ورود ppm ۱۰۰۰۰ آلودگی نترات سرب به ترکیب خاک پایه با ۱۰٪ کائولینیت مقدار مدول الاستیسیته در حدود ۱۸٪ نسبت به حالت غیر آلوده کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد در این غلظت با تغییر نوع جاذب از کائولینیت به بنتونیت اختلاف بین مدولهای الاستیسیته کمتر شده و به حدود ۱۲٪ میرسد. با افزایش غلظت نترات سرب به ppm ۲۰۰۰۰ اختلاف بین مقدار مدول الاستیسیته در ترکیب خاک پایه با دو جاذب کائولینیت و بنتونیت به حداقل رسیده و تقریباً معادل یکدیگر میباشند.

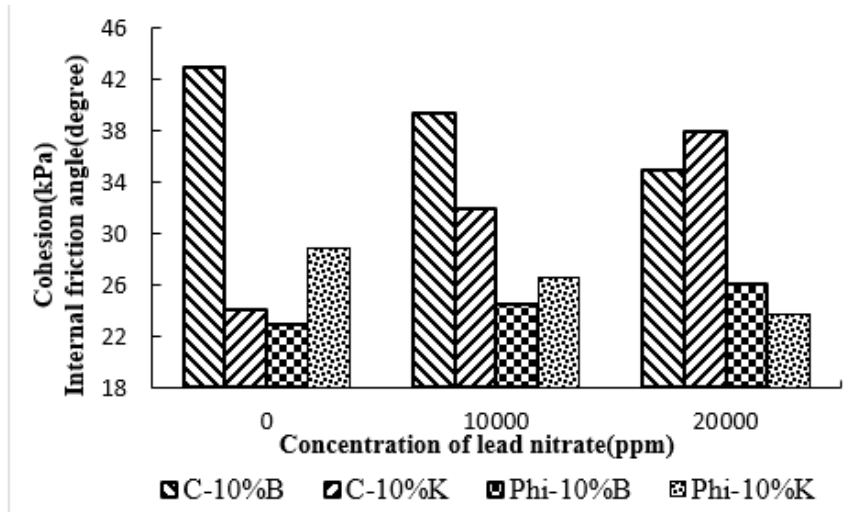
۵- تأثیر فلز سنگین بر روی ساختار خاک

پیوند بین کانیها نقش اساسی در تعیین رفتار کائولینیت و یا کانیهای با ساختار فلوکولهای، دارد [۲۷]. با توجه به وابستگی ساختارهای فلوکولهای به



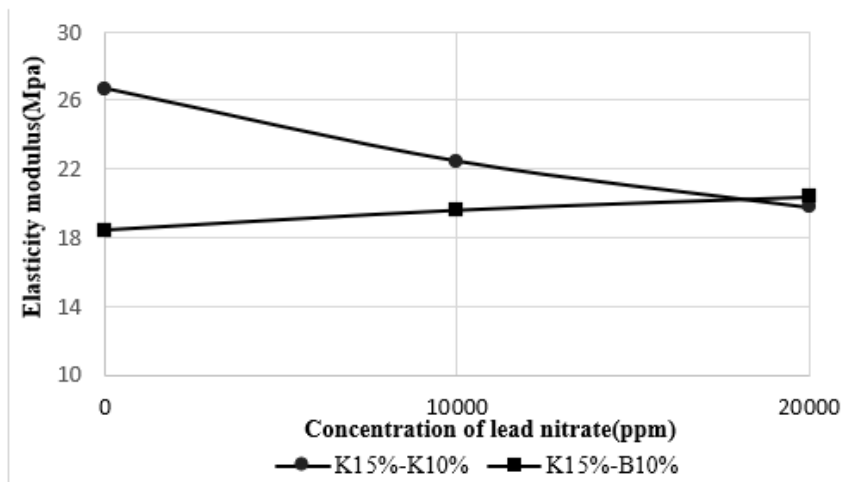
شکل ۱۰. تغییرات تنش- کرنش برای نمونه های خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های بنتونیت و کائولینیت در حالات آلوده شده و نشده در تنش همه جانبه (الف) ۵۰ kPa، (ب) ۱۰۰ kPa و (پ) ۱۵۰ kPa

Fig. 10. Stress-strain behavior for base composition with 10% bentonite and kaolinite adsorbent in two cases of contaminated an uncontaminated at different confining pressure of (a)50 KPa, (b)100 KPa and (c)150 Kpa



شکل ۱۱. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه های خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های بنتونیت و کائولینیت

Fig. 11. The changes in the internal friction angel and cohesion for base composition with 10% bentonite and kaolinite



شکل ۱۲. تغییرات مدول الاستیسیته برای نمونه های خاک پایه به همراه ۱۰٪ از جاذب های بنتونیت و کائولینیت

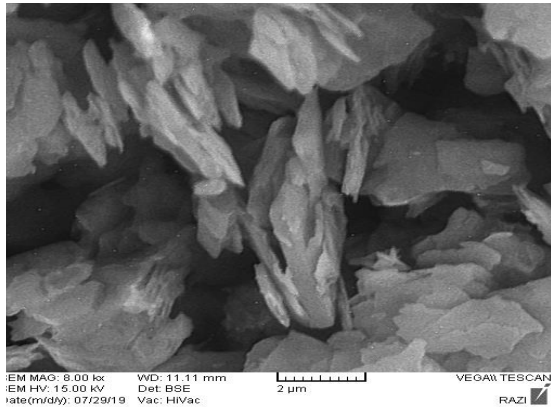
Fig. 12. The changes in the elasticity modulus for base composition with 10% bentonite and kaolinite

حالت پراکنده تغییر می یابد، که مشابه کائولینیت، این امر موجب کاهش مقاومت ترکیبات زئولیتدار شده است. اگر چه با توجه به شعاع اتمی بزرگتر سرب نسبت به سدیم، جانشینی سرب به جای سدیم آزاد درون حفرات زئولیت میتواند باعث تغییر سایز حفرات شود، ولیکن با توجه به پایداری نسبی زئولیت، تغییر پارامترهای مقاومتی به واسطه تغییر قطر کانالهای زئولیت عامل اصلی در تغییر رفتار زئولیت نمی باشد [۲۰]، لذا افزایش نیروی دافعه در کانیهای تشکیل دهنده زئولیت که به دلیل جذب سرب دو ظرفیتی به وجود میآید، عاملی تأثیرگذارتر می باشد. به منظور بررسی ریزساختار به وجود آمده در کانیهای مختلف رسی در دو حالت آلوده شده و نشده، عکس برداری با دستگاه میکروسکوپ الکترونی^۳ انجام شد. مطابق شکل ۱۳ نتایج برای خاکهای کائولینیت، زئولیت و بنتونیت در دو حالت آلوده نشده و آلوده شده با ۱۰۰۰۰ ppm نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده کائولینیت و زئولیت در حالت آلوده نشده ساختار فلوکولهای و بنتونیت ساختاری پراکنده دارد. جذب نیترات سرب در ترکیبات کائولینیتدار، سبب تضعیف پیوند هیدروژنی شده و با تخریب این پیوند، صفحات رسی از یکدیگر فاصله گرفته و تشکیل ساختار پراکنده را می دهند. همچنین در زئولیت نیز جایگزینی فلزات سنگین با کاتیونهای آزاد باعث افزایش دافعه بین پیوندهای تشکیل دهنده آن می شود [۲۰]. بنابراین میتوان گفت افزایش آلودگی در خاک زئولیت و کائولینیت باعث کاهش ساختار فلوکولهای و افزایش تمایل به تشکیل ساختار پراکنده، می شود. در بنتونیت آلوده با نیترات سرب تبادل کاتیونی بین Pb^{2+} و یونهای آزاد سدیم (Na^+) انجام شده و این تبادل کاتیونی باعث کاهش ضخامت آب لایه مضاعف می گردد. کاهش ضخامت آب لایه مضاعف باعث تشکیل ساختار فلوکولهای در بنتونیت و به تبع آن افزایش مقاومت بنتونیت آلوده نسبت به حالت غیرآلوده می شود. بنابراین به طوری کلی می توان گفت ساختار کائولن و زئولیت در حالت غیرآلوده فلوکولهای می باشد و با افزودن نیترات سرب و ورود فلز سنگین به خاک، تمایل قرارگیری صفحات رسی به حالت موازی با یکدیگر افزایش پیدا کرده، و ساختار خاک از فلوکولهای به سمت پراکنده سوق پیدا میکند. این در حالی می باشد که کاهش ضخامت آب لایه مضاعف در بنتونیت آلوده شده سبب کاهش ساختار پراکنده و تمایل آن به سمت ساختار فلوکولهای می باشد. لازم به ذکر می باشد در ترکیب خاک پایه به همراه جاذب بنتونیت تاثیر رفتار بنتونیت آلوده بر کائولینیت غلبه کرده است که این امر با توجه به ظرفیت تبادل کاتیونی بالای بنتونیت بوده و به همین دلیل در این ترکیب افزایش مقاومت برشی مشاهده شده است.

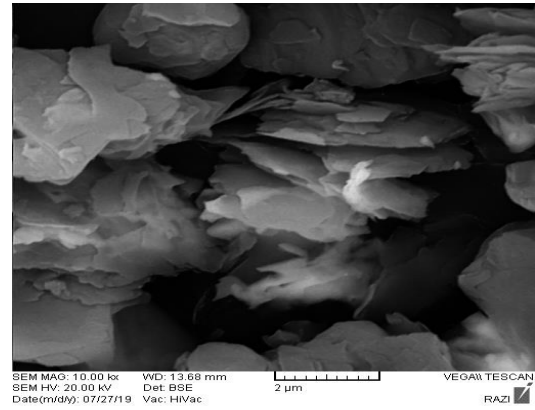
نیروی بین ذرات، عامل اصلی در تغییر رفتار کائولینیت، پیوند هیدروژنی می باشد. پیوند هیدروژنی سبب ایجاد یک کمربند برشی^۱ دور دانه‌ها گردیده، و افزایش غلظت آب حفرهای در خاک توسط آلاینده فلز سنگین سبب تخریب این کمربند برشی و کاهش مقاومت می گردد. به بیانی دیگر ورود آلاینده به داخل ترکیب کائولینیت موجب تبادل یونی بین کاتیونهای آزاد H^+ در کائولینیت با فلز سنگین (Pb^{2+}) می شود. در نتیجه این تبادل کاتیونی، پیوند هیدروژنی کاهش می یابد، و همین امر سبب می شود تا ذرات از یکدیگر کمی فاصله گرفته و لذا تمایل به ایجاد ساختار فلوکولهای بعد از جذب فلزات سنگین نسبت به حالت غیرآلوده کاهش یافته و تمایل به سمت تشکیل ساختار پراکنده افزایش یابد. کاتیونهای آزاد در بنتونیت به ویژه سدیمها باعث ایجاد ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی در بنتونیت شده و به همین دلیل با ورود آلودگی، جایگزینی بین فلزات سنگین با سدیمهای آزاد انجام می گردد. این جایگزینی باعث افزایش غلظت کاتیونها در نزدیکی صفحات رسی شده و همین امر موجب کاهش ضخامت آب لایه مضاعف می شود. با ورود آلودگی به بنتونیت، ساختار آن از حالت پراکنده (دافعه بین ذرات) به حالت فلوکوله (جاذبه بین ذرات) تغییر می یابد. به بیانی دیگر در حالت آلوده با توجه به افزایش تماس بین کانیهای بنتونیت، مقاومت افزایش یافته و این عامل تأثیر خود را در افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشان داده است. از طرفی دیگر کاهش نیروی دافعه بین ذرات و یا به عبارت دیگر کاهش ضخامت آب لایه دوگانه، باعث کاهش آب جذب شده گردیده و همین امر موجب کاهش چسبندگی در ترکیبات بنتونیت دار آلوده، شده است. جذب فلزات سنگین در زئولیتها را می توان ناشی از دو عامل دانست. عامل اول هندسه و ساختار منافذ^۲ زئولیت و کاتیونهای آزاد قرار گرفته در داخل این منافذ بوده و عامل دوم کاتیونهای قرار گرفته بر روی سطح زئولیت و قابلیت تبادل آنها با آلاینده های مختلف می باشد. جذب برخی از فلزات سنگین بیشتر وابسته به هندسه حفرات زئولیت، کاتیونهای قرار گرفته در داخل منافذ و چگونگی اتصال بین آنها می باشد. از طرفی، جذب برخی از فلزات سنگین مانند Pb^{2+} و Cu^{2+} بیشتر وابسته به قابلیت تبادل کاتیونهای سطحی در زئولیت می باشد [۲۷]. با ورود فلزات سنگین و جایگزینی آنها با کاتیونهای تک ظرفیتی، توازن بارهای الکتریکی در زئولیت بر هم خورده، و با توجه به تغییر به وجود آمده در اثر تبادل کاتیونی و افزایش بارهای مثبت، نیروی دافعه بین سربهای جذب شده در زئولیت باعث افزایش فاصله بین کانیهای تشکیل دهنده آن می گردد. با افزایش نیروی دافعه ساختار زئولیت از حالت فلوکولهای به

1 Shear band
2 Micropores

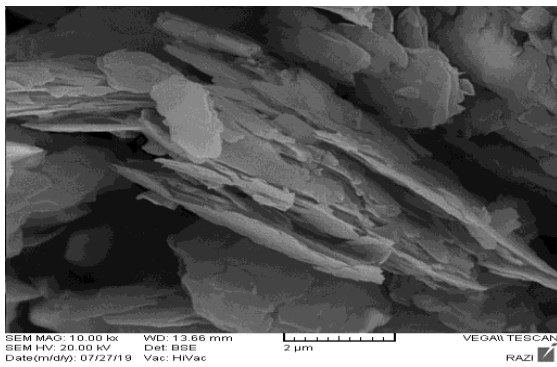
3 scanning electron microscope(SEM)



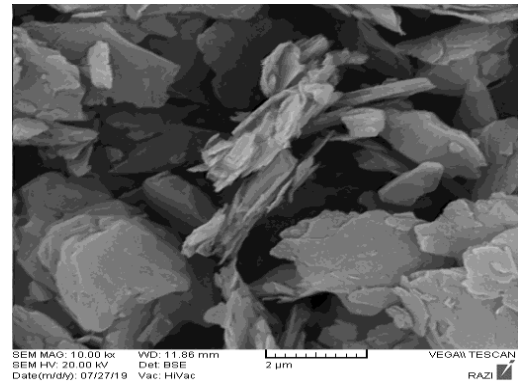
(ب)



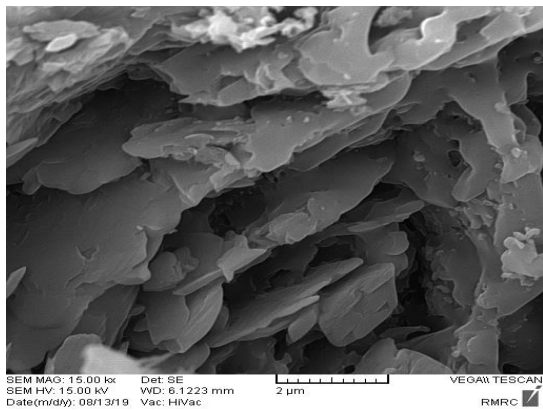
(الف)



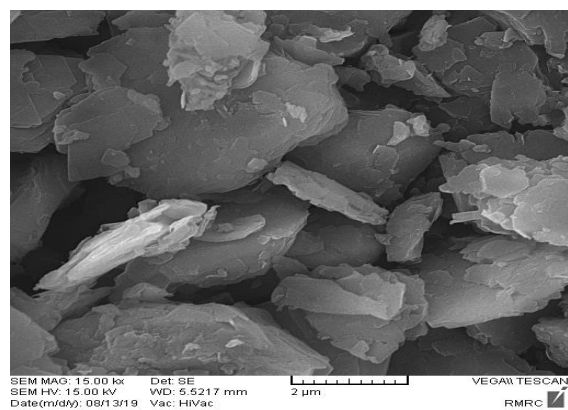
(خ)



(پ)



(خ)



(چ)

شکل ۱۳. تغییرات ساختاری در بنتونیت (الف) غیر آلوده (ب) آلوده، کائولینیت (پ) غیر آلوده و (ج) آلوده و زئولیت (چ) غیر آلوده، (خ) آلوده

Fig. 13. Structural changes for (a) uncontaminated and (b) contaminated bentonite, (c) uncontaminated and (d) contaminated kaolinite, and (e) uncontaminated and (f) contaminated zeolite

۶- نتیجه گیری

از فلوکولهای به پراکنده می شود. این در حالی می باشد که در خاکهای رسی با خاصیت خمیری زیاد (بنتونیت) افزایش غلظت نیترات سرب باعث کاهش ضخامت آب لایه مضاعف گردیده و همین امر باعث تغییر ساختار پراکنده به فلوکولهای می شود.

۵- ورود فلز سنگین سرب در خاکهای حاوی ریزدانه با خاصیت خمیری کم، باعث کاهش مقاومت برشی خاک شده و این در حالی است که در خاکهای آلوده با فلزات سنگین که حاوی ریزدانه های رسی با خاصیت خمیری بالا می باشند، افزایش مقاومت برشی با افزایش غلظت آلاینده مشاهده شده است.

۶- اگر چه نتایج نشان می داد با تغییر در نوع کانی جاذب از زئولیت به بنتونیت، مقاومت برشی در حالت غیرآلوده کاهش می یابد، با این وجود با افزایش غلظت نیترات سرب در ترکیبات بنتونیت دار، مقاومت برشی افزایش و در ترکیبات زئولیت دار کاهش یافته است.

۷- در ترکیب خاک پایه با جاذبهایی با خصوصیات خمیری کم (کائولینیت و زئولیت) آلوده شدن با فلز سرب و افزایش غلظت آن منجر به کاهش مدول الاستیسیته می شود در حالی که در خاک پایه حاوی جاذب بنتونیت، آلودگی منجر به افزایش مدول الاستیسیته می گردد.

منابع

- [1] RM. McCuin, JL. Clancy, Modifications to United States Environmental Protection Agency methods 1622 and 1623 for detection of Cryptosporidium oocysts and Giardia cysts in water. Appl. Environ. Microbiol. 69(1). (2003) 267-74.
- [2] D. Grasso, M.A. Butkus, D. O'Sullivan, N.P. Nikolaidis, Soil-washing design methodology for a lead-contaminated sandy-soil, Water research, 31(12). (1997) 3045-3056.
- [3] M.Hassanlourad, M.hossein zade, S.Naeini, Effect of Lead Nitrate on Behavior and Shear Strength Parameters of sandy clay. Amirkabir Journal of Civil Engineering, (2019) doi:10.22060/ceej.16146.6142. (In persian).
- [4] A.Negahdar, M. Shabanian, M. NikGhalbPour, The Effect of Heavy Metal Contaminants on the Strength Parameters of Sandy Clay, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(5). (2018) 835-844. (In persian).

با توجه به مخاطرات زیست محیطی ناشی از ورود آلاینده های فلز سنگین به طبیعت، استفاده از جاذبهایی طبیعی و ارزان قیمت یکی از راهکارهای مناسب در جهت مقابله با نفوذ آلودگی به لایه های زیرین و آبهای زیرزمینی است. تغییر در جنس و نوع کانی جاذبها، باعث تغییر در رفتار برشی خاکهای آلوده با فلزات سنگین می شود. در این تحقیق ترکیب ماسه با ۱۵٪ کائولینیت به عنوان ترکیب خاک پایه در نظر گرفته شده و به منظور افزایش ظرفیت جذب فلزات سنگین در ترکیب خاک پایه، از جاذبهایی مختلف با خصوصیات خمیری متفاوت استفاده شده و رفتار مقاومتی آنها در حالت آلوده شده به نیترات سرب و غیرآلوده مورد بررسی قرار گرفته است. اهم نتایج حاصله به شرح زیر می باشد:

۱- افزودن زئولیت به خاک پایه علاوه بر افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، سبب افزایش پارامترهای مقاومتی نسبت به خاک پایه در هر دو حالت آلوده و غیرآلوده می شود. بنابراین جایگزینی زئولیت به جای کائولینیت علاوه بر افزایش عملکرد زیست محیطی خاک، کارایی ژئوتکنیکی را نیز در هر دو حالت آلوده و غیرآلوده افزایش می دهد.

۲- مقاومت نهایی در ترکیب خاک پایه به همراه زئولیت در حالت آلوده شده با غلظتهای ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ppm نیترات سرب، به طور متوسط در حدود ۱۱٪ و ۲۱٪ نسبت به حالت غیرآلوده کاهش می یابد. همچنین ورود فلزات سنگین باعث افزایش چسبندگی در ترکیب زئولیتدار و کاهش چسبندگی در ترکیب بنتونیتدار می گردد.

۳- با افزایش غلظت نیترات سرب، زاویه اصطکاک داخلی نیز برای ترکیب خاک پایه با دو نوع جاذب با خصوصیات خمیری کم و زیاد، به یکدیگر نزدیک تر می گردد. به طوری که اختلاف بین زاویه اصطکاک داخلی بین دو ترکیب زئولیت دار و بنتونیت دار در حالت غیرآلوده در حدود ۲۵٪ می باشد که با ورود نیترات سرب با غلظت حداکثری، درصد اختلاف بین زاویه اصطکاک داخلی دو ترکیب به ۳٪ کاهش می یابد.

۴- با تغییر در خصوصیات خمیری جاذب از حالت خمیری کم (زئولیت) به خمیری زیاد (بنتونیت)، رفتار مقاومتی خاکهای آلوده تغییر می یابد. بر اساس تغییرات به وجود آمده در پارامترهای مقاومتی و عکس برداری میکروسکوپی، میتوان گفت در ترکیباتی که کانی بخش ریزدانه آن دارای خاصیت خمیری کم باشد (زئولیت و کائولینیت)، افزایش غلظت نیترات سرب باعث تخریب پیوند بین ذرات شده و همین امر موجب تغییر ساختار بین ذرات

- zeolite as clay liner, *Applied Clay Science*, 25.(2004), 83–91.
- [15] Y.Yukselen-Aksoy ,Characterization of two natural zeolites for geotechnical and geoenvironmental applications, *Applied Clay Science*, 50.(2010) 130–136.
- [16] Y. Zhao, Review of the Natural, Modified, and Synthetic Zeolites for Heavy Metals Removal from Wastewater. *Environ. Eng. Sci*, 33 (2016) 443-454.
- [17] F.Oliveira ,On The Study of The Catalytic Transfer Hydrogenation Reaction, The Hydrogenation of 3-Buten-1-ol On a Pd-Black Film, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 272(1-2).(2007) 225-232.
- [18] M.Fazelipour, A. Takdastan, Survey on chlorine application in sequencing batch reactor waste sludge in order to sludge minimization, *Asian Journal of Chemistry*, 23(7). (2011) 2994-2998. (In Persian).
- [19] C. Ning, M. Xu, D.C.-W. Hui, C.S.K. Lin, G. McKay, Study of quench effect on heavy metal uptake efficiency by an aluminosilicate-based material, *Chem. Eng. J.*, 311.(2017) 37-45.
- [20] M. Hong, L. Yu, Y. Wang, J. Zhang, Z. Chen, L. Dong, Q. Zan, R. Li, Heavy Metal Adsorption with Zeolites: the Role of Hierarchical Pore Architecture, *Chemical Engineering Journal*, 359.(2019) 363-372.
- [21] J. Park, Assessment of shear strength characteristics and zinc adsorption capacities of zeolite-amended soils for adsorptive fill materials, Department of Civil and Environmental Engineering for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, Seoul National University, (2017).
- [22] A.A. Moghal, M. Ashfaq, M.A. Al-Shamrani, A. Al-Mahbashi, Effect of Heavy Metal Contamination on the Compressibility and Strength Characteristics of Chemically Modified Semiarid Soils, *Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste*, 24(4).(2020) 04020029.
- [23] J.Zang, W.Wang, Z. Wang, L. Zheng, X.Xie ,Field Test on Electro-Osmosis in a Heavy Metal Contaminated Soil: Electrokinetic Remediation and Reinforcement of the soil, *Int. J. Electrochem. Sci*, 54.(2020) 1230-1241.
- [5] V.Ouhadi, M.Fakhimjoo, T.Naeini, The Comparison of Plastic and Permeability Behavior of Bentonite in the Presence of Organic and Heavy Metal Contaminants, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(85). (2017) 25-36.(In persian).
- [6] S.Srivastava , V. Kumar ,Lead contamination in soils: a comparative study of geotechnical parameters, *Discovery The Intl Daily Journal*, 40. (2015) 235–240.
- [7] A. Muththalib, B.A. Baudet, Effect of heavy metal contamination on the plasticity of kaolin-bentonite clay mixtures and an illite-smectite rich natural clay, In *E3S Web of Conferences* , 92.(2019) 10005.
- [8] Y.Zhang, Y. Zheng, S. Han, S. D. Wan, H. Yang, M.Duan, Experimental study on deformation of heavy metal contaminated expansive soil under cyclic loading, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* , 237(2).(2019) 022026.
- [9] Y. Chu, S. Liu, F. Wang, G. Cai, H. Bian, Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15).(2017) 13561-13575.
- [10] J. S. Li, Q. Xue, P. Wang, Z. Z. Li, Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay, *Applied Clay Science*, 105.(2015) 192-199.
- [11] Y.Chu, SY.Liu, GJ.Cai, HL,Bian, A study in the micro-characteristic and electricity properties of silt clay contaminated by heavy metal zinc, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 31;2(14).(2016) 556-9.
- [12] S. Arasan, T. YETİMOĞLU, Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32(2).(2008) 107-115.
- [13] S. Malamis, E. Katsou, A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process parameters, kinetics and isotherms, *J. Hazard. Mater*, 252-253.(2013) 428-461.
- [14] A.Kaya, S.Durukan ,Utilization of bentonite-embedded

- of a sand-bentonite mixture (SBM) contaminated simultaneously with lead (II) and diesel. *Applied Clay Science*, 157.(2018) 102-110.
- [27] G.Spagnoli, D. Rubinos, H. Stanjek, T. Fernández-Steeger, M. Feinendegen, M. R. Azzam, Undrained shear strength of clays as modified by pH variations, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(1). (2012) 135-148.
- [24] H. Kurama, A. Zimmer, W. Reschetilowski, Chemical Modification Effect on the Sorption Capacities of Natural Clinoptilolite, *Chem Eng Technol*, 25(3).(2002) 301-305.
- [25] K.He, Y.Chen, Z.Tang, Y.Hu, Removal of heavy metal ions from aqueous solution by zeolite synthesized from fly ash, *Environmental Science and Pollution Research*, 3.(2016) 2778 – 2788.
- [26] S.Taheri, T.Ebadi, R. Maknoon, M. Amiri, Predicting variations in the permeability and strength parameters

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. HosseinZade, M. Hassanlourad, S. A. Naeini, *Effect of different adsorbents in shear resistance of lead heavy metal contaminated soil*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(12) (2022) 5357-5376.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18801.6965](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18801.6965)



