عملکرد بهسازی به روش تزریق در مدول عکس العمل بستر ماسه آلوده به شیرابه زباله های شهری

میر عبدالحمید مهرداد[۱]، ابوالفضل اسلامی[۲]، پیمان غلامی فرد[۳]* و هادی احمدی[۴]

۱- دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، پست الکترونیکی mehrdad@guilan.ac.ir
۲- دانشیار مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پست الکترونیکی afeslami@aut.ac.ir
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان ، پست الکترونیکی p_gholamifard@yahoo.com
۴- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه گیلان ، پست الکترونیکی ha1360@gmail.com
⋮

چکیده

یکی از رایج ترین شیوه های بهسازی خاک های ماسه ای، تزریق سیمان است که از طریق افزایش مقاومت برشی وسختی خاک به دلیل ایجاد سیمنتاسیون در ماسه ، می تواند به طور موثری سبب لغزش توان باربری ، کاهش نشست و رفع معظلات ژئوتکنیکی از جمله پدیده روانگرایی شود. ازسوی دیگر یکی از ملزومات سیمانی شدن مناسب خاکها ، استفاده از آب مناسب است تا واکنش شیمیایی مورد نظر بطور مطلوبی انجام گردد. این در حالی است که در قسمت هایی از مناطق شهری نفوذ شیرابه ناشی از نفوذ غیر مهندسی زباله ها سبب آلودگی شدید یا نسبتا شدید آب در این مناطق شده است. در این مطالعه با مدلسازی کوچک مقیاس تزریق سیمان در خاکهای ماسه ای ، بصورت فیزیکی اثر آلودگی ناشی از نفوذ شیرابه های زباله شهری بر عملکرد بهسازی در افزایش سختی خاکهای ماسه ای بررسی شده است . بدین منظور از آزمایش بارگذاری صفحه کوچک مقیاس جهت تعیین مدول عکس العمل بستر و سختی خاک استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که اثر آلاینده ها در عملکرد معمول تزریق سیمان بسیار قابل ملاحظه بوده و لازم است توجهی جدی به بحث آلودگی خاک و مطالعه آن قبل از انجام بهسازی از این طریق به عمل آید .

واژه‌های کلیدی: بهسازی ماسه- تزریق سیمان- خاکهای آلوده- شیرابه زباله های شهری- مدلسازی فیزیکی

۱- مقدمه

زباله ها یکی از مهم ترین آلوده سازهای خاک ها محسوب می شوند. زباله ها می توانند با نفوذ در داخل زمین خاک و آب را آلوده سازند. تجزیه بخش آلی زباله در محل دفن زباله به همراه نفوذ آب باران ، مایع آلوده ای به نام شیرابه را تولید می کند، که به دلیل دارا بودن ترکیبات سمی و خطرناک، خطر قابل توجهی برای محیط زیست دارند. متاسفانه در بسیاری از شهرهای کشور به دلیل نبود امکانات مناسب دفع زباله از قبیل ساخت لندفیل مهندسی، کورههای زباله سوز ، کارخانه کمپوست و سایر موارد متأسفانه زباله ها به صورت غیراصولی در منطقه ای انباشت می شوند. تولید و مدیریت فاضلاب در مراکز دفن زباله، به عنوان یکی از مهم ترین مسائل زیست محیطی در مراکز دفن زباله مطرح شده است. مهم ترین اثر زیست محیطی فاضلاب مراکز دفن، آلودگی آبهای سطحی و زیرزمینی است [۱].

از سوی دیگر یکی از رایج ترین شیوه های بهسازی خاک های ماسه ای، تزریق سیمان است که از طریق افزایش مقاومت برشی وسختی خاک به دلیل ایجاد سیمنتاسیون در ماسه ، می تواند به طور موثری سبب لغزش، توان باربری ، کاهش نشست و رفع معظلات ژئوتکنیکی از جمله پدیده روانگرایی شود [۲]. منتها یکی از ملزومات سیمانی شدن مناسب خاکها ، استفاده از

آب مناسب است تا واکنش شیمیایی مورد نظر بطور مطلوبی انجام گردد[۳]. این در حالی است که در قسمت هایی از مناطق شهری نفوذ شیرابه ناشی از نفوذ غیر مهندسی زباله ها سبب آلودگی شدید یا نسبتا شدید آب در این مناطق می‌شود[۴].

با توجه به اینکه یکی از مهم ترین پارامترهای ژئوتکنیکی جهت طراحی پی های انعطاف پذیر سختی خاک است که با مدول عکس العمل بستر بیان می‌شود. تحقیقات بسیاری توسط محققان مختلف برای تعیین مدول عکس العمل بستر (Ks) انجام شده ،که در واقع همان نسبت تنش اعمالی به نشست ایجاد شده است. تعیین Ks از طریق چند روش کلی زیر امکان پذیر می باشد:

- از طریق انجام آزمایشات محلی (مانند آزمایش بارگذاری صفحه ، آزمایش فشار سنجی یا دیلاتومتر)
- از طریق انجام آزمایشات آزمایشگاهی
- تعیین Ks را بر اساس ظرفیت باربری خاک (پیشنهاد شده توسط گروهی از محققان)
- تعیین Ks با پارامترهای الاستیک خاک (Esو νS) (پیشنهاد شده توسط گروهی از محققان)

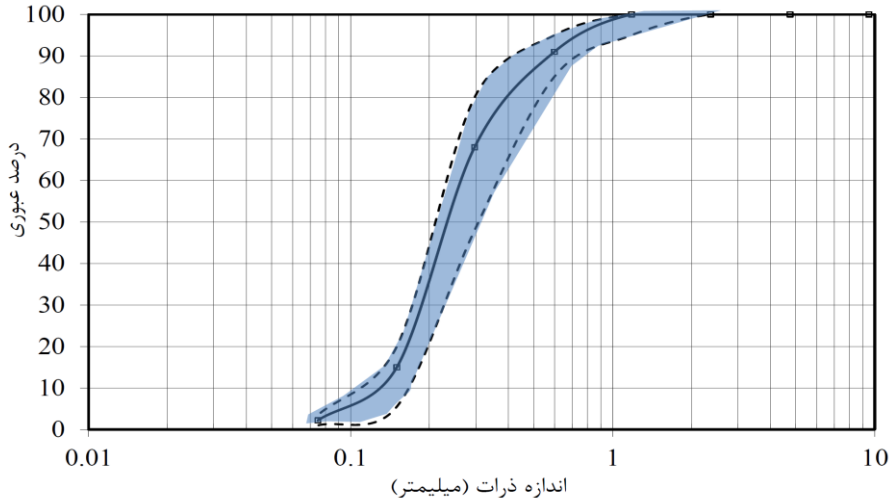
محققان متعددی در رابطه با تعیین ضریب عکس العمل خاک و نیز نشست خاک با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه کار کرده اند که از جمله مهمترین آنها می توان از (ترزاقی،۱۹۵۵) ، (باند،۱۹۶۱) ، (تنگ،۱۹۶۲) ، (بیروم و اگستاد،۱۹۶۳) ، (برومز،۱۹۶۴) ، (نیر،۱۹۷۴) ، (باولز،۱۹۷۷) ، (پری،۱۹۷۸) ، (آرنولد،۱۹۸۰) و نبیل (۱۹۹۳،۱۹۸۵ و ۱۹۹۶) نام برد[۵]. در این مطالعه تاثیر وجود و نفوذ شیرابه زباله های شهری در عملکرد بهسازی سختی خاک ها مورد توجه قرار گرفته است.

۳- برنامه آزمایشگاهی

خاک مورد استفاده، ماسه ریزدانه نسبتاً یکنواخت انزلی است که بطور شاخص بسیاری از لایه های تحت الارضی در شهر ساحلی بندرانزلی را در بر گرفته است. دانه‌بندی ماسه در شکل ۱ و مشخصات شاخص خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به مشخصات عنوان شده برای ماسه، تراکم نسبی ۳۰ ، ۵۰ و ۷۰ درصد به ترتیب بعنوان شاخص تراکم شل ، متوسط و متراکم در انجام آزمایش در نظر گرفته شده است.

دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه به منظور تعیین مدول عکس العمل بستر شامل جعبه ای مکعبی شکل به ابعاد ۶۰ × ۶۰ سانتیمتر در پلان و حدود ۶۰ سانتیمتر ارتفاع است که بر روی قاب فولادی قرار گرفته است. یک وجه از جعبه مکعبی مذکور از صفحه ای از جنس پلکسی گلاس و بصورت شفاف ساخته شده است، بطوریکه می توان عوارضی همچون سطح آب را بصورت عینی مشاهده کرد و یا اینکه از لایه های مختلفی از خاک جهت تهیه نمونه استفاده نمود. بر روی دستگاه جک بارگذاری هیدرولیکی جهت اعمال بارگذاری قائم نصب گردیده است که شامل یک گیج جابجایی سنج دیجیتال (LVDT) برای اندازه گیری مقدار تغییرشکل های ایجاد شده در سطح نمونه می باشد. برنامه ریزی اعمال نیرو طوری صورت گرفته است که امکان انجام آزمایش هم به صورت کنترل تنش و هم به صورت کنترل کرنش وجود دارد. در این آزمایش ها بارگذاری بصورت کنترل کرنش انجام شده است. دستگاه شامل ثبت کننده اطلاعات دیجیتال (Data logger) می‌باشد که می تواند مقادیر بار و تغییرشکل ها را بصورت همزمان ثبت نماید. صفحه تحتانی برای اعمال تنش یکنواخت به نمونه، بصورت مربعی و به ابعاد ۱۰ × ۱۰ سانتیمتر می باشد. در شکل ۲ نمایی از باکس (جعبه) بارگذاری مورد استفاده در این مطالعه، نشان داده شده است.

جهت آلوده نمودن خاک از شیرابه جمع اوری شده از زباله های جامد شهری استفاده شده است. این سیال در نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی نسبت به آب مصرفی در تهیه نمونه اشباع ، با آب مخلوط شده و در نمونه ماسه ریخته شده است. جهت تزریق از سیمان پرتلند تیپ II استفاده شده و آزمایش بر روی نمونه ها پس از گذشت ۲۸ روز انجام شده است.



شکل ۱: نمودار دانه بندی ماسه انزلی و خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها

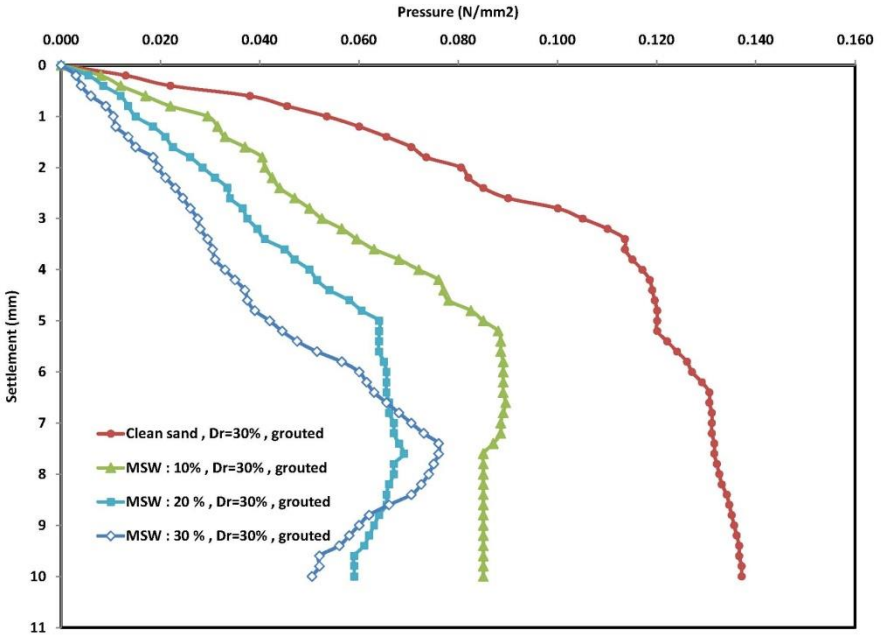
جدول ۱: مشخصات شاخص ماسه مورد استفاده در آزمایشها

پارامتر	اندازه متوسط (D_{50})	ضریب یکنواختی (Cu)	طبقه بندی	e_{max}	e_{min}	Gs
مقدار	۰/۲۴	۲/۲۸	SP	۰/۸۳	۰/۵۷	۲/۶۶

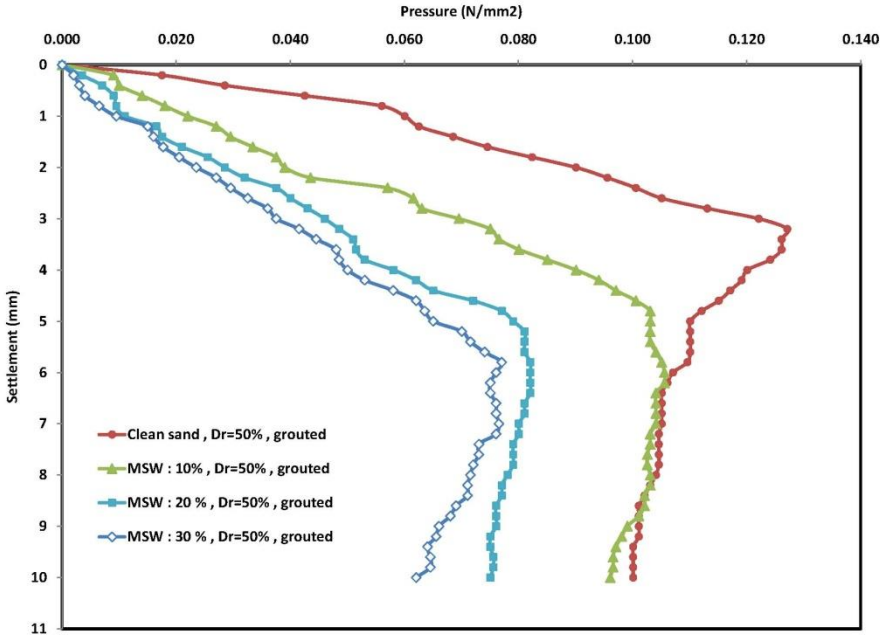
شکل ۲: تصویر دستگاه بارگذاری مورد استفاده در آزمایش

۳- بررسی نتایج آزمایشگاهی

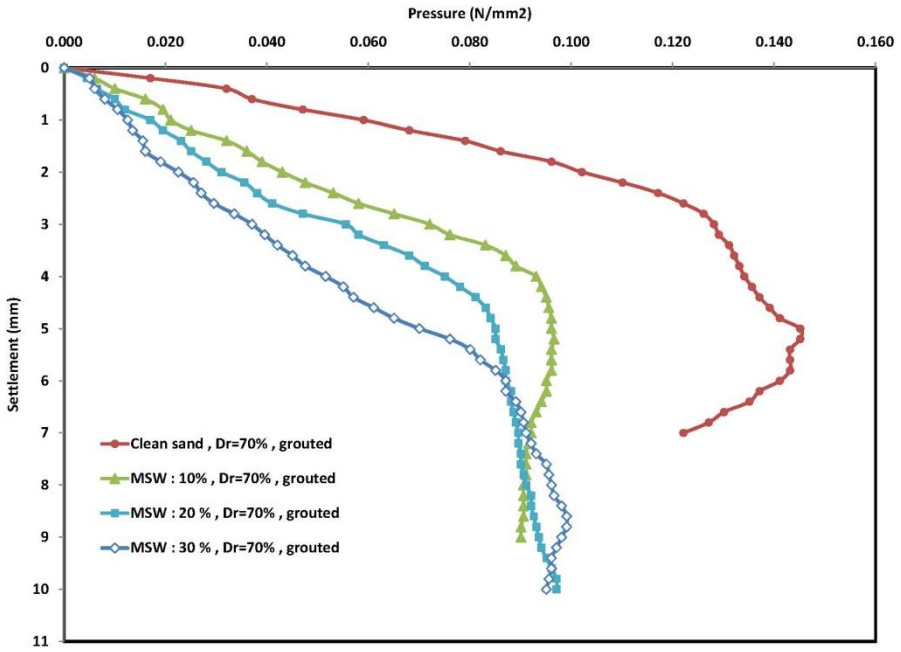
نتایج آزمایش بارگذاری برای نمونه های ساخته شده در حالت های مختلف، با دانسیته نسبی ۳۰ ، ۵۰ و ۷۰ درصد، به ترتیب در شکل های ۳ تا ۵ برای ماسه های آلوده به شیرابه زباله و در وضعیت بهسازی شده بوسیله تزریق سیمان در آنها نشان داده شده است. صرف نظر از خطاهای ناشی از شرایط خاک در برخی فشارها، همانگونه که در شکل ها می توان دید با افزایش مقدار آلایندگی خاک، از شیب نمودار فشار-نشست کاسته می شود..



شکل ۳: نمودار فشار-نشست برای نمونه های تزریق شده در ماسه با دانسیته نسبی ۳۰ درصد



شکل ۴: نمودار فشار-نشست برای نمونه های تزریق شده در ماسه با دانسیته نسبی ۵۰ درصد



شکل ۵: نمودار فشار-نشست برای نمونه های تزریق شده در ماسه با دانسیته نسبی ۷۰ درصد

بر اساس نمودارهای فشار-نشست ثبت شده، مدول عکس العمل از طریق شیب نمودارهای مذکور تعیین شده و در شکلهای ۶ تا ۸ آورده شده است. بدیهی است با تزریق سیمان در خاک ماسه ای، اثر سیمنتاسیون (سیمانی شدن) سبب خواهد شد که سختی خاک افزایش یافته و در نتیجه مدول عکس العمل بیشتری پس از تزریق سیمان حاصل گردد. همانگونه که انتظار می رفت در نمونه های تمیز تزریق اثر بیشتری در بهسازی خاک ماسه ای خواهد داشت. در این حالت در نمونه های شل تا حدود ۳ برابر ، بهسازی با تزریق مدول عکس العمل بستر را افزایش داده است که البته در نمونه های متراکم تر این تاثیر کمی کمتر شده و به ۲/۳ برابر رسیده است که البته همچنان قابل ملاحظه است.

همانگونه که از شکل های ۶ تا ۸ می توان مشاهده نمود، با افزایش درصد شیرابه زباله های شهری در خاک، از مقدار مدول عکس العمل بستر ماسه کاسته خواهد شد. رابطه ای تقریباً خطی بین افزایش مواد آلاینده و مدول عکس العمل بستر برای هر یک از تراکم های نسبی ماسه قابل مشاهده است. با استفاده از روابط آماری و برازش بهترین ارتباط خطی بین پارامترهای تراکم نسبی، مقدار مواد شیرابه زباله های شهری و مدول عکس العمل بستر ، می توان ارتباط بین پارامترهای مذکور را بصورت رابطه زیر نشان داد:

$$Ks\left(\times 10^{2}\right) = 0.816 + 1.213\,Dr - 1.502\,MSW \qquad (۱)$$

که در آن:

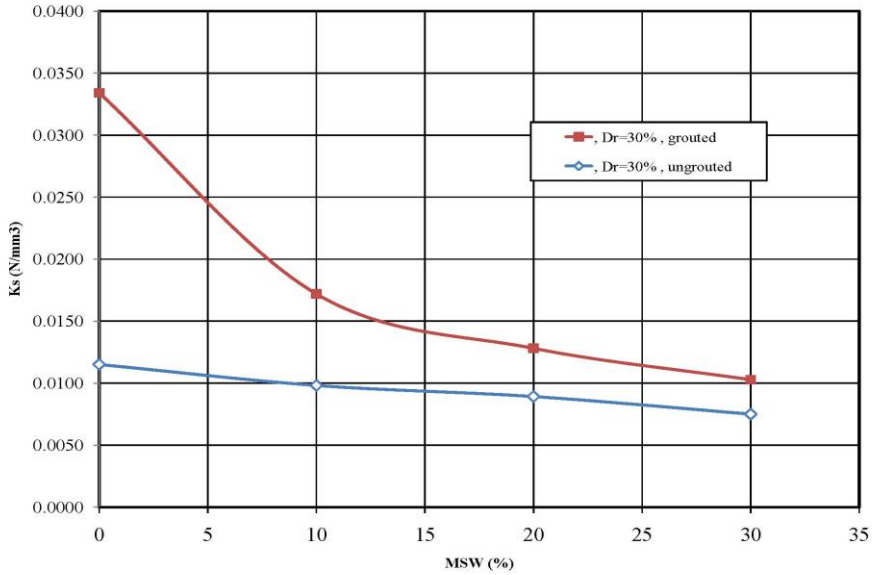
Dr : تراکم نسبی ماسه (بصورت نسبت)

MSW : مقدار شیرابه زباله های شهری (بصورت نسبت حجمی شیرابه به حجم کل سیال منفذی)،

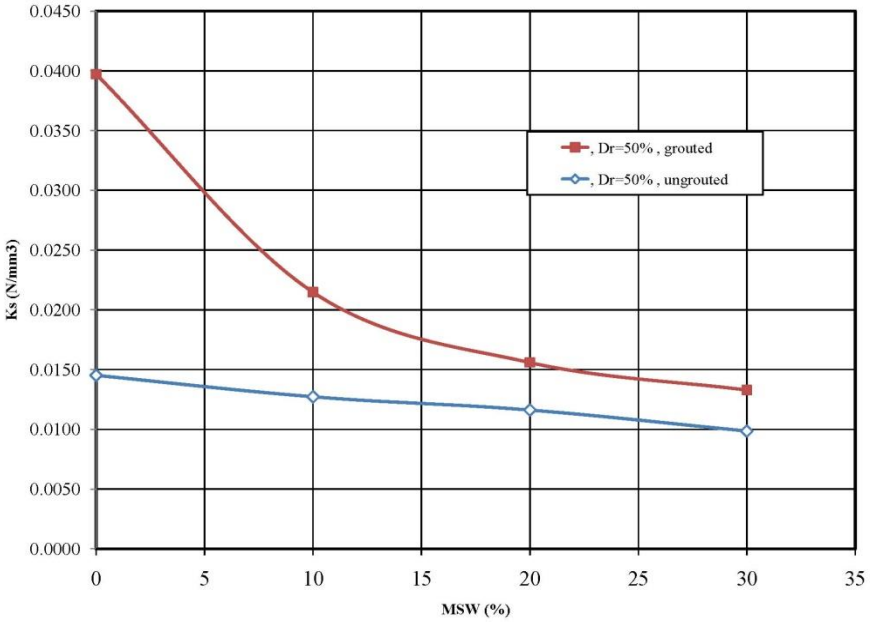
و Ks : مدول عکس العمل بستر بر حسب MPa/mm یا همان N/mm3 می باشد.

با توجه به رابطه (۱) تاثیر کاهش مدول عکس العمل بستر در اثر افزایش مقدار شیرابه زباله های شهری تقریباً مشابه با اثر کاهش تراکم نسبی خاک است.

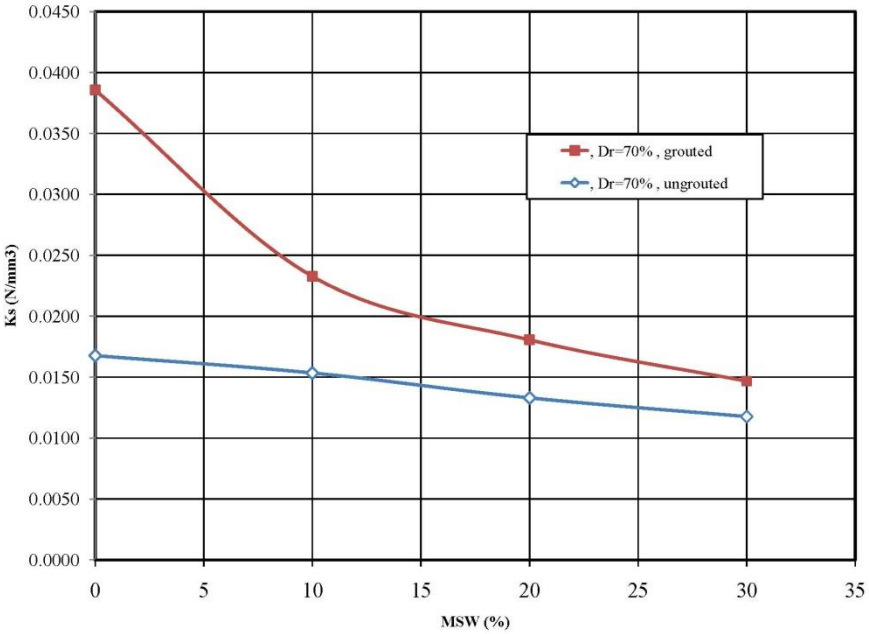
شایان ذکر است که رابطه (۱) از طریق رگراسیون خطی بصورت برازش خطی گام به گام و با استفاده از نرم افزار Minitab (Ver 16.2.4) بدست آمده است. بر این اساس رابطه مذکور با توجه به نتایج آزمایش های آزمایشگاهی انجام شده، حدود ۸۹ درصد دارای ضریب همبستگی (R^2) در پیش بینی نتایج مشابه است. هر چند ارائه رابطه دقیق تر مستلزم آزمایش بر روی انواع خاکهای ماسه ای است و در تحقیق فوق تنها بر روی ماسه شاخص بندرانزلی آزمایش شده است.



شکل ۶: تغییرات مقادیر مدول عکس العمل بستر بر حسب درصد شیرابه زباله برای ماسه با دانسیته نسبی ۳۰ درصد



شکل ۷: تغییرات مقادیر مدول عکس العمل بستر درصد شیرابه زباله برای ماسه با دانسیته نسبی ۵۰ درصد



شکل ۸: تغییرات مقادیر مدول عکس العمل بستر بر حسب درصد شیرابه زباله برای ماسه با دانسیته نسبی ۷۰ درصد

لذا بررسی نتایج در مورد نمونه های بهسازی شده از طریق تزریق دوغاب سیمان در نمونه های ماسه ای تمیز و آلوده در درصد تراکم های مختلف نتایج قابل توجهی داده است. با افزودن شیرابه زباله به شدت اثر بهسازی کاهش یافته و مدول عکس العمل خاک نسبت به حالت تمیز افت شدیدی پیدا کرده است. به بیان دیگر وجود موادآلاینده موجود در شیرابه زباله های جامد شهری به شدت مانع از عملکرد مناسب سیمانی شدن خاک می شود و پیوند شیمیایی مناسب بین دانه های ماسه و دوغاب سیمان تزریق شده بوجود نمی آید. به عنوان مثال در ماسه های شل، تزریق در نمونه تمیز حدود ۳ برابر سختی و مدول عکس العمل بستر را افزایش داده است در حالیکه با وجود ۱۰ درصد شیرابه زباله های جامد شهری در آب منفذی نمونه ها، این رشد سختی خاک به ۱/۷۵ برابر رسیده است که حدود ۶۰ درصد تاثیر در شرایط تمیز است. این کاهش اثر با افزایش مواد آلوده موجود در منافذ خاک توسعه می یابد و در نمونه های با ۳۰ درصد شیرابه زباله های جامد شهری اثر تزریق سیمان در بهسازی ماسه تا ۴۵ درصد تاثیر در شرایط تمیز تنزل یافته است. با ازدیاد مواد آلاینده به بیش از ۱۰ درصد، هرچند همچنان شاهد کاهش مدول عکس العمل بستر می باشیم، منتها از شدت افت این پارامتر سختی کاسته می شود و شیب نمودار تغییرات ملایم تر می شود. به نظر می رسد علت این امر را بتوان در کفایت مقدار کمی شیرابه جهت عملکرد منفی مواد آلاینده در انجام واکنش شیمیایی مناسب سیمان ، آب و سنگدانه عنوان کرد و با توجه به اینکه سیمان نه بصورت خشک، بلکه بصورت دوغاب تزریق شده است، تا حدودی با آغشته نمودن سنگدانه های ماسه ای می تواند سیمانی شدگی در خاک را تامین نماید. با بررسی روند کاهشی اثر تزریق سیمان در بهسازی خاکهای آلوده به نفوذ شیرابه های جامد شهری، در تراکم های بالاتر مشاهده می گردد که با افزایش تراکم نسبی ماسه، تاثیر وجود مواد آلاینده در کاهش اثر بهسازی اندکی کمرنگ تر می‌شود. این افت تاثیر نسبت به شرایط تمیز در نمونه های با ۱۰ درصد شیرابه زباله، به حدود ۶۸ درصد و در نمونه با ۳۰ درصد شیرابه به حدود ۵۵ درصد رسیده است. به نظر می رسد با افزایش تراکم خاک به دلیل افزایش زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت خاک، در نتیجه درگیری بیشتر بین دانه ای، سهم اصطکاک بین دانه ای در باربری همچنان قابل توجه باشد و از سوی دیگر با کاهش تخلخل در خاک ، در نتیجه تزریق دوغاب سیمان به درون منافذ، مواد سیمانی بطور بهتری می تواند جایگزین محتوی آلوده موجود در منافذ شده و اثر قابل ملاحظه تری در آن اعمال نماید.

مشابه آنچه در مورد نمونه ها قبل از اعمال بهسازی ذکر گردید، در مورد نمونه های بهسازی شده بصورت تزریق دوغاب سیمان در خاک، با استفاده از روابط آماری و بهترین برازش بین پارامترهای تراکم نسبی، مقدار شیرابه زباله های شهری و مدول عکس العمل بستر ، می توان رابطه ای بصورت زیر بر اساس نتایج آزمایش های مدلسازی فیزیکی انجام شده در این پژوهش معرفی نمود:

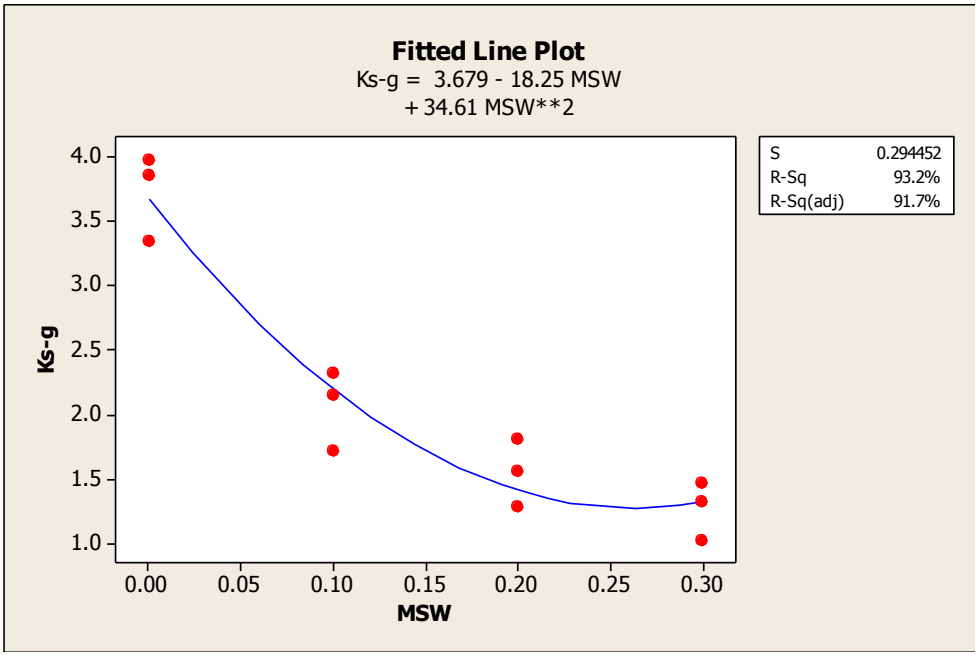
$$K_{s-g}\left(\times 10^2\right) = 2.68 + 1.30\,Dr - 7.86\,MSW \qquad (۲)$$

که در آن Ks-g : مدول عکس العمل بستر نمونه بهسازی شده از طریق تزریق سیمان بر حسب N/mm^3 می باشد.

برازش خطی گام به گام انجام شده بر روی داده های آزمایشگاهی نشان می دهد که رابطه فوق دارای حدود ۸۵ درصد ضریب همبستگی در ارائه رابطه و ۷۴ درصد ضریب همبستگی جهت پیش بینی نتایج مدول عکس العمل بستر در خاکهای مشابه است. همانگونه که این برازش نشان می دهد تاثیر افزایش شیرابه زباله های شهری در افت مدول عکس العمل بستر به مراتب بیشتر از اثر دانسیته نسبی در خاکهای بهسازی شده از طریق تزریق سیمان است. از اینرو با صرف نظر کردن از اثر دانسیته نسبی در مقابل اثر وجود شیرابه می توان رابطه غیرخطی زیر را با تقریب بهتری ارائه نمود:

$$K_{s-g}\left(\times 10^2\right) = 3.68 - 18.25\,MSW + 34.61\,MSW^2 \qquad (۳)$$

در شکل ۹ نمودار بهترین خط برازش شده درجه دوم برای نمایش ارتباط مناسب مدول عکس العمل بستر ماسه های تزریق شده با دوغاب سیمان در مناطق آلوده به نفوذ شیرابه زباله های جامد شهری نشان داده شده است.



شکل ۹: نمودار بهترین خط برازش شده درجه دوم ماسه های آلوده به نفوذ شیرابه در شرایط بهسازی با دوغاب سیمان

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد بهسازی به روش تزریق در سختی خاکهای ماسه ای آلوده به شیرابه زباله های شهری، با استفاده از دستگاه مدلسازی فیزیکی آزمایش بارگذاری صفحه بررسی گردیده است. بررسی ها نشان می دهد که با تزریق سیمان در خاک ماسه ای، اثر سیمنتاسیون (سیمانی شدن) سبب خواهد شد که سختی خاک افزایش یافته و در نتیجه مدول عکس العمل بیشتری پس از تزریق سیمان حاصل گردد. در نمونه های تمیز تزریق اثر بیشتری در بهسازی خاک ماسه ای خواهد

داشت. در این حالت در نمونه های شل تا حدود ۳ برابر ، بهسازی با تزریق مدول عکس العمل بستر را افزایش داده است که البته در نمونه های متراکم تر این تاثیر کمی کمتر شده و به ۲/۳ برابر رسیده است که البته همچنان قابل ملاحظه است.

در خاکهای آلوده به زباله های جامد شهری ، وجود موادآلاینده موجود در شیرابه زباله های جامد شهری به شدت مانع از عملکرد مناسب سیمانی شدن خاک می شود و پیوند شیمیایی مناسب بین دانه های ماسه و دوغاب سیمان تزریق شده بوجود نمی آید. در این شرایط با افزایش شیرابه زباله به شدت اثر بهسازی کاهش یافته و مدول عکس العمل خاک نسبت به حالت تمیز افت شدیدی پیدا کرده است. منتها در خاکهای بهسازی شده از طریق تزریق سیمان، شدت افت پارامتر سختی خاک با افزایش مواد آلوده کاسته می شود و شیب نمودار تغییرات ملایم تر می شود. به نظر می رسد علت این امر را بتوان در کفایت مقدار کمی شیرابه جهت عملکرد منفی مواد آلاینده در انجام واکنش شیمیایی مناسب سیمان ، آب و سنگدانه عنوان کرد و با توجه به اینکه سیمان نه بصورت خشک، بلکه بصورت دوغاب تزریق شده است، تا حدودی با آغشته نمودن سنگدانه های ماسه ای می تواند سیمانی شدگی در خاک را تامین نماید. همچنین با بررسی روند کاهشی اثر تزریق سیمان در بهسازی خاکهای آلوده به نفوذ شیرابه های جامد شهری، در تراکم های بالاتر مشاهده می گردد که با افزایش تراکم نسبی ماسه، تاثیر وجود مواد آلاینده در کاهش اثر بهسازی اندکی کمرنگ تر می شود.

مراجع

[۱] غیاث الدین، م.، داویدیان، م.، اثر دفن زباله بر آبهای سطحی و زیرزمینی منطق کهریزک و جاجرود، مجله محیط شناسی – سال سیزدهم – شماره ۱۴، ۱۳۶۵.

[۲] اسلامی، الف. مهندسی پی، طراحی و اجرا ، وزارت مسکن و شهرسازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۵۹۴ صفحه، ۱۳۸۸.

[3] Dano, C., Hicher , P.Y. and Tailliez, S., Engineering Properties of Grouted Sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 3, March 1, 2004.

[4] Zekkos, D., Kavazanjian, E., Bray, J., Matasovic, N., and Riemer, M , September 2010) , physical characterization of municipal solid waste for geotechnical purposes , Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 136, Issue 9 , pp 1231–1241

[5] Bowles, J. E., Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1988.