



تسلیح خاک رس تثبیت شده با آهک با استفاده از ژئوگرید

محمودرضا عبدی^{۱*}، حامد میرزائی فر^۲، مهدی رفیعی‌نیا^۳ و حسین ملک‌زاده^۳

^۱ دانشیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳ دانش آموخته مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

Abdi@kntu.ac.ir

چکیده: روش‌های بهسازی خاک جهت بهبود پایداری و اطمینان از توان باربری مناسب تحت بارسازه‌ها مهم و ضروری بوده و می‌تواند در مقایسه با سایر روش‌ها در هزینه و زمان پروژه صرفه جویی نماید. به منظور بهبود مشخصات فنی و رفتار خاک‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از آن‌ها تثبیت با آهک و دیگری تسلیح خاک با عناصر دارای مقاومت کششی بالا نظیر ژئوگریدها است. این روش‌ها به صورت مجزا توسط محققین متعددی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. در تحقیق حاضر تثبیت خاک با آهک و تسلیح با ژئوگرید به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌های رسی با مقادیر ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد آهک تثبیت و توسط دو آرایش مختلف ژئوگرید تسلیح و پس از عمل‌آوری به مدت ۱، ۷، ۱۴ و ۳۰ روز در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افزودن حداقل ۳ درصد آهک باعث افزایش قابل ملاحظه در مقاومت فشاری و کاهش کرنش گسیختگی می‌گردد و تسلیح با ژئوگرید نمونه‌های تثبیت شده تأثیری بر خصوصیات مقاومت فشاری و شکل‌پذیری نمونه‌ها نداشته که به احتمال بسیار زیاد ناشی از ابعاد نسبتاً کوچک ژئوگریدها بود که در حین آزمایش مانع از به کشش افتادن آنها گردیده است.

کلمات کلیدی: خاک رس، تثبیت خاک، تسلیح، آهک، ژئوگرید.

Lime Stabilized Clay Reinforced With Geogrids

M.R. Abdi, B. H. Mirzaeifar, C. M. Rafieinia and D. H. Malekzadeh

Abstract: Soil improvement techniques are important and necessary to increase stability and bearing capacity of soils so that they can successfully sustain loads of the superstructures and lead to saving time and cost of projects. There are many methods of improving soil characteristics which includes lime stabilization and geosynthetic reinforcements. These methods have been widely investigated by many researchers separately. In the current research effects of lime addition and geogrid reinforcement concurrently on clay soil characteristics have been investigated. Clay samples with diameter and height of 50 and 100 mm, respectively have been stabilized with 1, 3, 5 and 7 percent lime and reinforced with two different geogrid arrangements and cured for 1, 7, 14 and 30 days at 35 degree centigrade before being subjected to unconfined compression tests. Results show that lime addition up to 3% significantly increases compressive strengths and reduces strains at failure and using geogrid as reinforcement for stabilized samples does not enhance these characteristics which are attributed to the small size of geogrids used.

Keywords: Clay, Stabilization, Reinforcement, Lime, Geogrid.

۱- مقدمه

۱-۱- تثبیت خاک

با افزایش رطوبت ظرفیت باربری خاک‌های رسی کاهش یافته و تورم ناشی از آن موجب بروز خسارات زیادی در ابنیه و راه‌های ساخته شده بر روی این مصالح می‌گردد. لذا به منظور رفع این مشکلات از تثبیت خاک استفاده می‌شود. تثبیت فرآیندی است که طی آن ویژگی‌های نامطلوب مصالح بهبود یافته و مصالح عملکرد بهتری تحت شرایط بارگذاری مورد نظر از خود نشان می‌دهد. بدین منظور آهک هیدراته $(Ca(OH)_2)$ و یا آهک زنده (CaO) به خاک افزوده و تحت رطوبت بهینه متراکم می‌گردد. افزودن آهک به خاک رس واکنش‌هایی شامل فلوکولاسیون (چسبیدن و توده شدن ذرات رس)، تبادل کاتیونی، پوزولانی و کربناسیون می‌باشد [۲]. Rajasekaran گزارش نموده که واکنش‌های تبادل کاتیونی در کوتاه مدت رخ داده و بر ویژگی‌هایی از قبیل حدود اتربرگ و توزیع دانه‌بندی خاک تاثیرگذار است. در حالیکه واکنش‌های پوزولانی زمان‌بر و بر خصوصیات مقاومتی، تثبیت حجم و تراکم‌پذیری خاک تاثیرگذار می‌باشد [۹]. واکنش‌های پوزولانی باعث تغییر بافت کریستالی خاک رس و ترکیب شیمیایی کانی‌ها شده و در نتیجه تغییرات عمده‌ای در خواص فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک بوجود می‌آورد. افزودن آهک به خاک، منجر به افزایش تمرکز یون‌های OH^- و در نتیجه افزایش pH مخلوط می‌شود. در صورت وجود میزان مناسب آهک، pH مخلوط حدوداً تا ۱۲/۴ افزایش یافته و موجب انحلال آلومینا و سیلیکای موجود در رس می‌گردد [۱۱]. یون‌های سیلیسیم و آلومینیم حاصله از حل شدن سیلیکات‌ها و آلومینات‌های کائولینیت با یون‌های OH^- ترکیب شده و $Al(OH)_3$ و $Si(OH)_2$ تولید می‌کند. سپس این هیدروکسیدها با یون‌های کلسیم موجود در آهک ترکیب می‌گردد. ترکیبات سیلیکات و آلومینات با آهک تشکیل سیلیکات یا آلومینات کلسیم هیدراته (CSH یا CAH) را می‌دهد که موجب سمانته شدن و افزایش مقاومت می‌گردد. این واکنش‌ها تابع زمان بوده و تا هنگامی که سیلیکات و آلومینات کلسیم هیدراته موجود باشند، ادامه می‌یابند. در نتیجه این واکنش‌ها تولید ترکیبات سیمانی گسترش یافته و این مواد ذرات خاک را به یکدیگر چسبانده و موجب افزایش مقاومت ترکیب خاک و آهک

می‌گردد. نتایج تحقیقات Guney و همکاران نشان داده که تثبیت خاک‌های رسی با آهک موجب کاهش چشمگیر قابلیت تورم می‌گردد [۴]. عبدی و همکاران با انجام تحقیقاتی ضمن تایید نتایج فوق گزارش کرده‌اند که تثبیت با آهک موجب افزایش تندی و شکنندگی خاک می‌شود [۱۷]. Filiz و Eren گزارش نموده‌اند که مقاومت CBR خاک SC پس از تثبیت با ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک به ترتیب افزایش ۲، ۹، ۱۲ و ۱۱ برابری از خود نشان می‌دهد و شاخص خمیری این خاک کاهش می‌یابد [۳]. نتایج تحقیقات Kabir و Davoudi نشان داده که مقاومت فشاری خاک CL-ML تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک پس از زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز افزایش قابل توجهی می‌یابد [۶].

۱-۲- تسلیح خاک

عناصر تسلیح عمدتاً به منظور پایدارسازی سطوح شیبدار، افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک، جداسازی لایه‌ها، زهکشی و جلوگیری از ترک‌های حاصل از انقباض انجام می‌شود. تسلیح خاک عبارت از مسلح کردن خاک به وسیله عناصر دارای مقاومت کششی بالا است. اثرات سودمند خاک مسلح ناشی از افزایش مقاومت کششی و مقاومت برشی ناشی از اندرکنش در سطح تماس خاک-مسلح کننده می‌باشد. نتایج آزمایشات سه محوری انجام شده توسط Haeri و همکاران بر روی نمونه‌هایی از ماسه‌ی مسلح نشان داد که عامل تسلیح باعث افزایش مقاومت و کرنش گسیختگی و کاهش در روند کاهش مقاومت بعد از رسیدن به مقاومت حداکثر می‌شود و تاثیر این پارامترها با افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل افزایش می‌یابد [۵]. همچنین نسبت مقاومت ماسه مسلح به ماسه غیر مسلح با افزایش فشار همه جانبه کاهش می‌یابد و تاثیر اندازه برای نمونه‌های مسلح نسبت به نمونه‌های غیر مسلح بیشتر است. نتایج تحقیق Yoo نشان داده که تسلیح خاک موجب گسترده‌تر و عمیق‌تر شدن ناحیه گسیختگی زیر پی و نهایتاً افزایش ظرفیت باربری آن می‌شود [۱۲]. همچنین افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید موجب افزایش قابل توجه در ظرفیت باربری پی می‌گردد. نتایج مطالعات انجام شده توسط بهادری و معتمدی در زمینه مقاومت در برابر روانگرایی ماسه اشباع مسلح شده با ژئوسنتتیک‌ها با

۲- مصالح

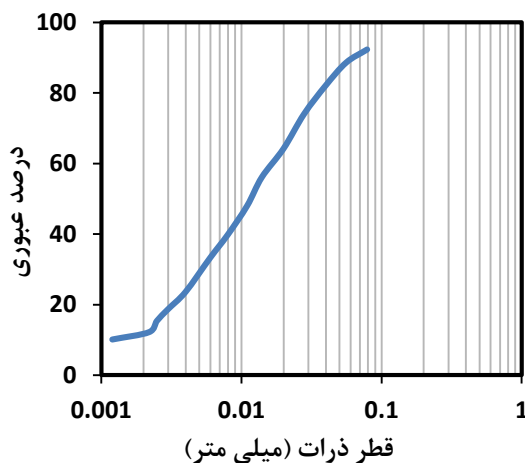
۲-۱- خاک کائولینیت

در این تحقیق به منظور کاهش اثر تغییرات مصالح روی نتایج آزمایشات، از خاک عرضه شده در بازار تحت عنوان تجاری کائولینیت، به عنوان رس استفاده شده است. این خاک توسط شرکت صنایع چینی ایران تولید و در بسته‌های ۵۰ کیلوگرمی عرضه می‌شود که در تولید کاشی، سرامیک و صنایع سفال‌گری استفاده می‌گردد.

منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل ۱ نشان داده شده و حد روانی، حد خمیری و دامنه خمیری آن که طبق استاندارد ASTM D 4318-87 تعیین گردیده به ترتیب برابر ۴۵، ۲۶ و ۱۹ درصد می‌باشد. خاک مورد استفاده دارای خاصیت خمیری متوسط بوده و بر اساس سیستم طبقه بندی یونیفاید در گروه CL قرار می‌گیرد.

۲-۲- آهک

آهک مصرفی در این تحقیق دارای وزن مخصوص ۲/۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب بوده که به منظور پرهیز از استفاده از مصالح رطوبت دیده و کلوخه شده، از الک شماره ۴۰ عبور داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است.



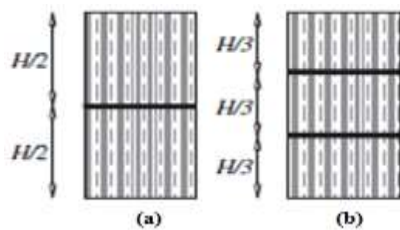
شکل ۱: منحنی دانه بندی خاک

۲-۳- ژئوگرید

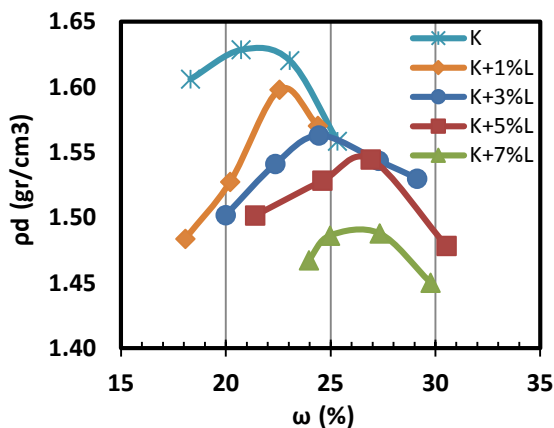
در این تحقیق با هدف تسلیح خاک، از ژئوگرید با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ استفاده شده و تصویر آن نیز در شکل ۲ ارائه گردیده است. این ژئوگرید از شرکت مشیران شبکه تهیه شده است.

استفاده از دستگاه سه‌محوری تناوبی نشان داد مسلح‌سازی ماسه اشباع بویژه در دانسیته‌های پایین تاثیر قابل توجهی در بالا بردن مقاومت در برابر روانگرایی دارد [۱۴]. همچنین افزایش سختی المان مسلح کننده نیز موجب افزایش مقاومت در برابر روانگرایی می‌گردد. مطالعات انجام شده توسط Noorzad و Mirmoradi بر روی نوعی خاک چسبنده نشان داد که عامل تسلیح باعث افزایش مقاومت و کرنش گسیختگی و کاهش در روند کاهش مقاومت بعد از رسیدن به مقاومت حداکثر می‌شود و تاثیر این پارامترها با افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل افزایش می‌یابد [۸]. همچنین در این تحقیق مشاهده شد افزایش درصد رطوبت موجب کاهش مقاومت نمونه‌ها و افزایش کرنش محوری در لحظه گسیختگی می‌گردد. زیرا خاک رس در رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه به فرم فولکوله و در رطوبتی بیشتر از رطوبت بهینه به فرم پراکنده در خواهد آمد. تحقیقات Nazzal و همکاران روی نمونه‌های خاک GW-GC مسلح شده با انواع مختلف ژئوگرید نشان داد بهترین حالت، قرارگیری دو لایه ژئوگرید در 1/3 ارتفاع نمونه از بالا و پایین نمونه است [۷]. در مطالعات انجام شده توسط Sawwaf بر روی گروه شمع تحت بار جانبی مستقر بر خاک مسلح شده با ژئوگرید مشاهده شد افزایش تعداد لایه ژئوگرید در خاک‌های مترکم‌تر تاثیر بیش‌تری در مقاومت جانبی گروه شمع دارد. همچنین ملاحظه گردید با افزایش طول لایه تسلیح، مقاومت جانبی گروه شمع افزایش می‌یابد ولی چنانچه طول لایه تسلیح از ۳۴/۳ برابر قطر شمع فراتر رود افزایش طول لایه تسلیح دیگر تاثیری در مقاومت جانبی گروه شمع ندارد [۱۰]. لذا به منظور بهبود رفتار شکننده خاک‌های تثبیت شده که همواره باعث بروز خرابی‌هایی در بستر راه‌ها و یا پوشش مدفن زباله‌ها و بنابراین تحمیل هزینه‌های فراوان می‌گردد، در تحقیق حاضر، تثبیت خاک با آهک و تسلیح با ژئوگرید به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌های رسی با مقادیر مختلف آهک (۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزن خشک خاک) تثبیت و سپس توسط لایه‌های ژئوگرید (۱ و ۲ لایه) تسلیح و تحت دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد طی زمان‌های مختلف (۱، ۷، ۱۴ و ۳۰ روز) عمل‌آوری شده و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفته‌اند.

باشد [۳]. کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک تثبیت شده با آهک ناشی از تشکیل ترکیبات سیمانی حاصل از واکنش‌های تبادل کاتیونی در کوتاه مدت است. این ترکیبات در نقاط تماس ذرات تشکیل و قابلیت تراکم در نتیجه وزن مخصوص خشک حداکثر مخلوط را کاهش می‌دهند. از طرفی کاهش قابلیت تراکم‌پذیری باعث درشت‌تر شدن بافت و افزایش تخلخل مخلوط می‌گردد. هوای داخل این خلل و فرج به آسانی و بدون تغییر حجم با آب جایگزین می‌شود و بنابراین منجر به افزایش رطوبت بهینه مخلوط می‌گردد. خلاصه نتایج آزمایش‌های تراکم در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳: آرایش ژئوگریدها (a) یک لایه و (b) دو لایه



شکل ۴: تغییرات دانسیته خشک نسبت به درصد رطوبت مخلوط‌های مورد مطالعه

جدول ۲: خلاصه نتایج آزمایش‌های تراکم

ترکیب	ω_{opt} (%)	ρ_d (gr/cm ³)
رس	۲۱	۱٫۳
خاک - ۱ درصد آهک	۲۲	۱٫۰
خاک - ۳ درصد آهک	۲۴	۱٫۷
خاک - ۵ درصد آهک	۲۶	۱٫۴۵
خاک - ۷ درصد آهک	۲۷	۱٫۹

جدول ۱: مشخصات ژئوگریدها

جنس	شکل چشمه	وزن واحد سطح (gr/m ²)	ضخامت (mm)	ابعاد روزنها (mm)
پلی اتیلن	مربع	۲۸۶/۷	۱/۲	۵/۲۵×۵/۴



شکل ۲: شکل و اندازه ژئوگرید مصرفی

۳- آزمایش‌های آزمایشگاهی

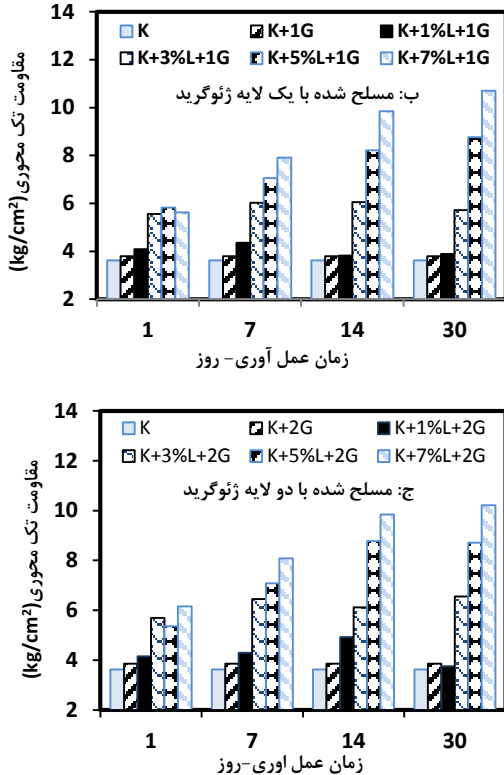
در انجام این تحقیق ۳ گروه نمونه به شرح ذیل تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است:
 - نمونه‌های تثبیت شده با ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد آهک و عمل‌آوری شده برای ۱، ۷، ۱۴ و ۳۰ روز.
 - نمونه‌های تسلیح شده با یک و دو لایه ژئوگرید (مطابق شکل ۳).
 - نمونه‌های تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با یک و دو لایه ژئوگرید و عمل‌آوری شده برای زمان‌های عمل‌آوری فوق‌الذکر.

۳-۱- آزمایش‌های تراکم

به منظور بررسی تاثیر میزان آهک بر وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه، برای هر ترکیب آزمایش تراکم طبق استاندارد ASTM D 698-78 انجام گردید. نتایج حاصل از انجام این آزمایش‌ها به صورت منحنی‌های تراکم برای ترکیبات مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد آهک افزوده شده به خاک رس، میزان رطوبت بهینه تراکم افزایش و دانسیته خشک ماکزیمم کاهش می‌یابد. این مشاهدات در تطابق با نتایج حاصل از تحقیقات Eren و Filiz بر روی خاک SC می‌-

۲-۳- نحوه تهیه نمونه‌ها

در تحقیق حاضر آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های سیلندری شکل با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر طبق استاندارد ASTM D2166-87 انجام گردیده است. به منظور حصول اطمینان از تکرارپذیری ساخت نمونه‌ها از هر ترکیب سه نمونه تهیه گردید و حداکثر تغییرات ۵ درصد در مقادیر مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌ها مورد پذیرش قرار گرفت. به منظور تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا خاک رس با مقدار مورد نظر آهک به صورت خشک به خوبی مخلوط و سپس آب مورد نیاز تدریجاً به آن اضافه شده است. عمل اختلاط به مدت ۳ دقیقه با همزن برقی انجام و سپس مخلوط بدست آمده طی چهار لایه در قالب ریخته و به صورت استاتیکی متراکم شده است. به منظور سهولت در خروج نمونه‌ها و جلوگیری از صدمات احتمالی قبل از ریختن مخلوط، جداره داخلی قالب‌ها روغن کاری شده است. پس از متراکم نمودن و مسطح کردن سطوح فوقانی و تحتانی نمونه‌ها، توسط یک جک هیدرولیکی آن‌ها را از قالب خارج و توزین شده‌اند. به منظور حفظ رطوبت نمونه‌ها در حین عمل‌آوری، آن‌ها را با چند لایه سلفون پوشانده و در ظروف پلاستیکی سربسته حاوی مقداری آب نگهداری شده‌اند. سپس این ظرف‌ها را در گرمخانه با دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت معین نگهداری و در موعد مقرر نمونه‌ها تحت آزمایش تک محوری قرار گرفته‌اند. به منظور حصول اطمینان از عدم خشک شدن نمونه‌ها در حین عمل‌آوری، قبل از انجام آزمایش تک محوری نمونه‌ها را دوباره توزین نموده، که حداکثر کاهش در میزان رطوبت در حد ۱ تا ۲ درصد تعیین شده که مورد قبول تشخیص داده شده است. شایان ذکر است که در تهیه کلیه نمونه‌ها از حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه بدست آمده از آزمایش‌های تراکم استاندارد استفاده شده است.

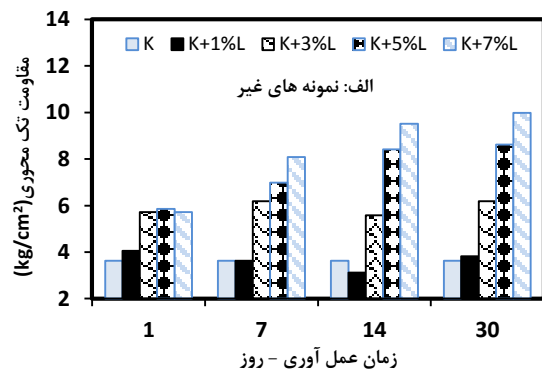


شکل ۵: تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نسبت به درصد آهک و زمان عمل‌آوری: (الف) نمونه‌های غیرمسلح، (ب) مسلح شده با ۱ لایه ژئوگرید و (ج) مسلح شده با ۲ لایه ژئوگرید

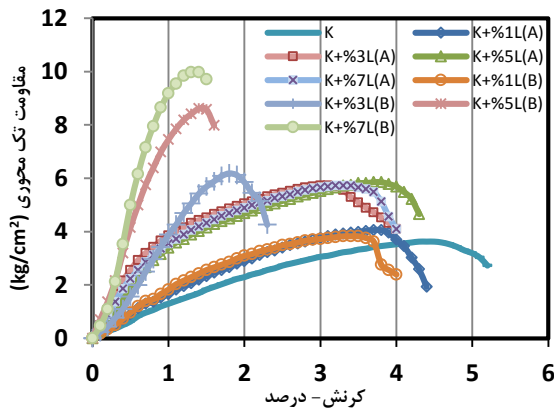
۴- نتایج

۴-۱- تاثیر آهک

شکل ۵ تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک غیر مسلح و مسلح شده با ۱ و ۲ لایه ژئوگرید را در زمان‌های عمل‌آوری مورد مطالعه نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۱ درصد آهک، حتی پس از گذشت ۳۰ روز، با مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت نشده تفاوت چندانی ندارد در حالیکه مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند. مطابق نتایج تحقیقات Yong و Ouhadi [۱۱]، عبدی و همکاران [۱۶] و Abdi [۱] در نمونه‌های تثبیت شده با ۱ درصد آهک به علت میزان آهک کم در این ترکیب‌ها، pH مخلوط خاک و آهک به میزان لازم برای آغاز انحلال گسترده سیلیکات و آلومینات کائولینت کفایت ننموده و لذا ترکیبات پوزولانی مورد نیاز برای افزایش مقاومت فشاری محصور نشده ایجاد

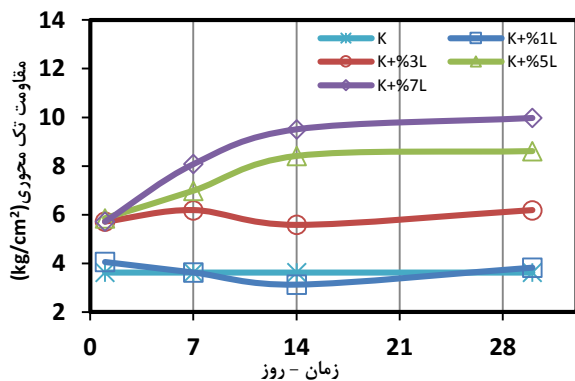


کرنش در زمان شکست نمونه‌ها کاهش و شیب منحنی‌های تنش - کرنش به شدت افزایش یافته که بیانگر تغییر رفتار نمونه‌ها از حالت انعطاف پذیر به ترد می‌باشد.



شکل ۶: رفتار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با آهک پس از ۱ و ۳۰ روز عمل آوری (به ترتیب A و B)

در شکل ۷ تغییرات مقاومت‌های فشاری حداکثر نمونه‌های کائولینیت تثبیت نشده و تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک نسبت به زمان نشان داده شده است.



شکل ۷: تغییرات مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌های تثبیت شده نسبت به زمان عمل آوری

ملاحظه می‌گردد که در نمونه‌های حاوی ۱ و ۳ درصد آهک بیشترین کسب مقاومت به ترتیب ۴ و ۵/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع طی یک روز عمل آوری حاصل گردیده و پس از آن زمان عمل آوری بر مقاومت این نمونه‌ها تقریباً بی‌تاثیر بوده است. این امر ناشی از درصد پایین آهک (۱ یا ۳ درصد) در نمونه و بنابراین عدم کفایت میزان آن برای ایجاد واکنش‌های پوزولانی گسترده می‌باشد. افزایش مقاومت در نمونه‌های تثبیت شده با ۱ درصد آهک عمدتاً ناشی از واکنش‌های تبادل کاتیونی بوده در صورتیکه در

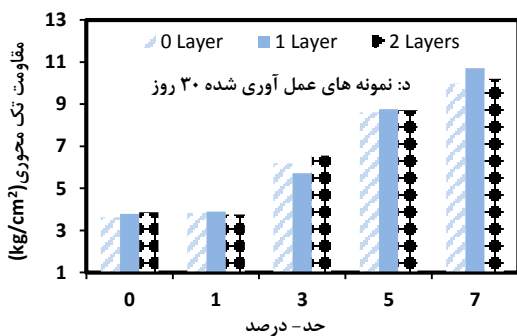
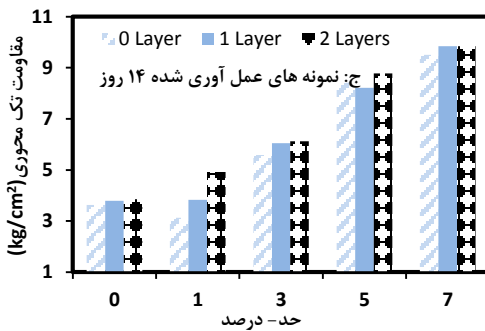
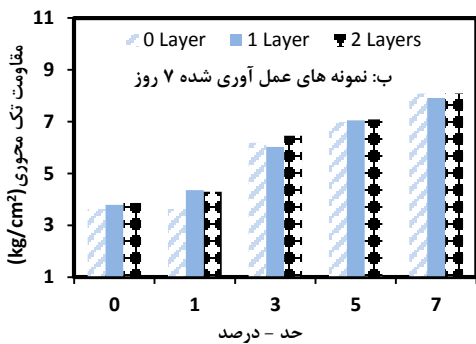
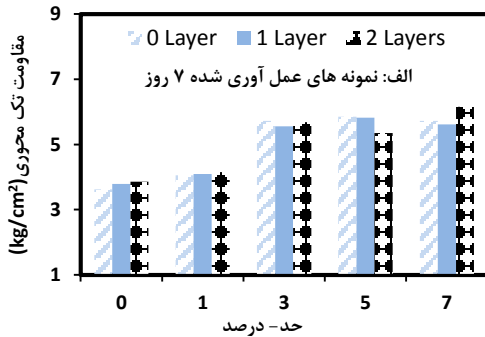
نمی‌گردد. افزایش جزئی مشاهده شده در مقاومت نمونه‌ها عمدتاً ناشی از واکنش‌های تبادل کاتیونی است که بلافاصله پس از ترکیب خاک و آهک رخ می‌دهند. این واکنش‌ها باعث به هم چسبیدن ذرات خاک رس شده و افزایش اندکی در مقاومت ایجاد می‌نمایند. افزایش مقاومت‌های فشاری با گذشت زمان عمل آوری، ناشی از ایجاد و گسترش پیوندهای بین ذره‌های ناشی از ترکیبات پوزولانی است که تابعی از میزان آهک، سیلیکا و آلومینای موجود در ترکیب و همچنین زمان عمل آوری می‌باشد. با افزایش میزان آهک خاصیت قلیایی محیط بیشتر شده و موجب انحلال بیشتر یون‌های سیلیسیم و آلومینیوم از طریق شکستن لایه‌های Si-O و Al-O برای ادامه فرآیند هیدراتاسیون می‌گردد و در نتیجه تولید محصولات سیمانی افزایش می‌یابد.

۲-۴- تاثیر زمان عمل آوری

رفتار تنش-کرنش نمونه‌های کائولینیت تثبیت نشده و تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و عمل آوری شده به مدت ۱ روز (منحنی‌های A) و ۳۰ روز (منحنی‌های B) (بدون عامل تسلیج) در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که افزودن ۱ درصد آهک به خاک تاثیر محسوسی بر مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌ها پس از ۱ روز عمل آوری تحت دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد نداشته، لیکن نمونه‌های تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک افزایش تقریباً ۶۰ درصدی در مقاومت فشاری حداکثر نسبت به کائولینیت به دست داده‌اند. حصول مقاومت‌های فشاری حداکثر تقریباً یکسان برای نمونه‌های تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک پس از ۱ روز عمل آوری نشانگر عدم تکمیل واکنش‌های شیمیایی و زمان‌بر بودن این واکنش‌ها می‌باشد. احتمالاً با گذشت ۱ روز عمل آوری هنوز مقادیر قابل ملاحظه‌ای از هیدروکسید کلسیم افزوده شده به صورت آزاد در مخلوط خاک و آهک باقی مانده که با گذشت زمان باعث افزایش روند گسترش واکنش‌های پوزولانی خواهد گردید. در رابطه با نمونه‌های عمل آوری شده به مدت ۳۰ روز نیز مشاهده می‌شود با افزایش درصد آهک افزوده از ۳ درصد به ۵ و ۷ درصد میزان مقاومت فشاری محدود نشده به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که در نتیجه وقوع واکنش‌های پوزولانی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش میزان آهک در مخلوط‌های مطالعه شده،

تسلیح خاک رس تثبیت شده

تاثیر وجود عوامل تسلیح قرار نگرفته است. علت عدم تاثیر عوامل تسلیح بر مقاومت فشاری نمونه‌ها صلب بودن بیش از حد این عوامل به دلیل ابعاد کوچک‌شان بوده است.



شکل ۸: تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح و غیر مسلح پس از: (الف) ۱ روز، (ب) ۷ روز، (ج) ۱۴ روز و (د) ۳۰ روز عمل‌آوری

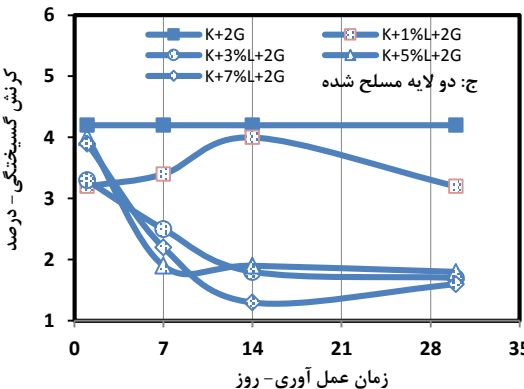
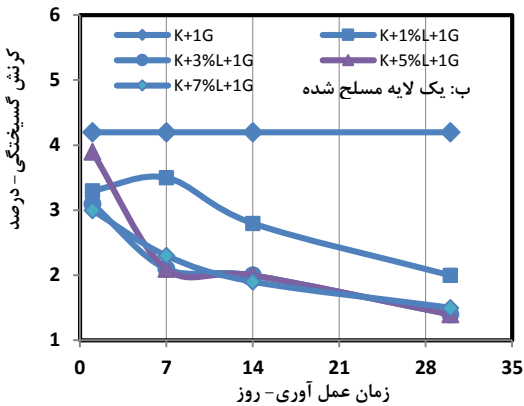
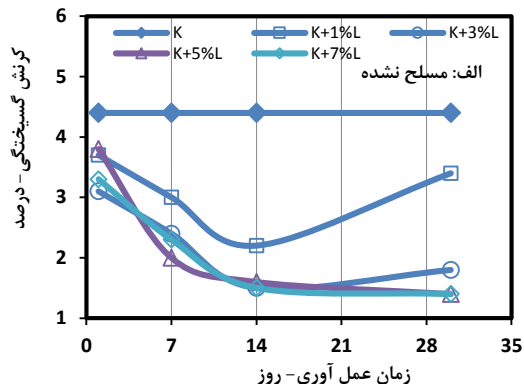
نمونه‌های تثبیت شده با ۳ درصد آهک مقاومت بدست آمده احتمالاً ناشی از واکنش‌های تبادل کاتیونی و همچنین واکنش‌های پوزولانی محدود بوده است. در خصوص نمونه‌های تثبیت شده با ۵ و ۷ درصد آهک بوضوح مشاهده می‌شود که بیشترین نرخ افزایش مقاومت طی ۱۴ روز اول عمل‌آوری حاصل گردیده و پس از آن مقاومت حداکثر نمونه‌ها افزایش چندانی نیافته است. این مشاهدات با نتایج گزارش شده توسط عبدی و همکارانش بر روند پیوسته افزایش مقاومت نمونه‌ها حتی بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری اختلاف دارد [۱].

رفتار مقاومت فشاری حداکثر- زمان عمل‌آوری این نمونه‌ها به خوبی نشان می‌دهد که واکنش‌های پوزولانی بسیار گسترده‌تر بوده و نیاز به زمان بیشتری برای تکمیل این واکنش‌ها می‌باشد. کاهش شدید نرخ افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۱۴ روز عمل‌آوری به خوبی بیانگر تکمیل این واکنش‌ها و بی‌تاثیر بودن زمان‌های طولانی‌تر عمل‌آوری می‌باشد. همانگونه که انتظار می‌رفت مقاومت فشاری نمونه‌های کائولینیت تثبیت نشده تحت تاثیر زمان عمل‌آوری قرار نگرفته‌اند. لیکن نمونه‌های تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک به ترتیب پس از ۳۰ روز عمل‌آوری باعث افزایش مقاومت‌های فشاری به میزان ۱/۵، ۲ و ۲/۵ برابری نسبت به کائولینیت تثبیت نشده گردیده‌اند.

۳-۴- تاثیر ژئوگرید

به منظور بررسی تاثیر همزمان تسلیح و تثبیت، تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده حداکثر نمونه‌های کائولینیت مسلح شده با ۱ و ۲ لایه ژئوگرید و تثبیت شده با ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد آهک برای زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۳۰ روز در شکل ۸ ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های (a) ۸ تا (d) ۸ به خوبی مشاهده می‌شود که مسلح نمودن نمونه‌های سیلندری شکل کائولینیت با ۱ و ۲ لایه ژئوگرید تاثیر آنچنانی بر مقاومت فشاری نداشته و نمونه‌های مسلح و غیر مسلح مقاومت‌های یکسانی در زمان شکست بدست داده‌اند. همچنین به جزء چند مورد اختلاف جزئی، مقاومت‌های فشاری نمونه‌های تثبیت شده کائولینیت و تسلیح شده با آرایش‌های مختلف در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده غیر مسلح تقریباً یکسان بوده است. نتایج به خوبی نشان می‌دهند که رفتار مقاومتی نمونه‌های تثبیت شده تحت



شکل ۱۰: تغییرات کرنش گسیختگی نسبت به زمان عمل-آوری نمونه های (a) غیر مسلح، (b) مسلح به ۱ لایه ژئوگرید و (c) مسلح به ۲ لایه ژئوگرید

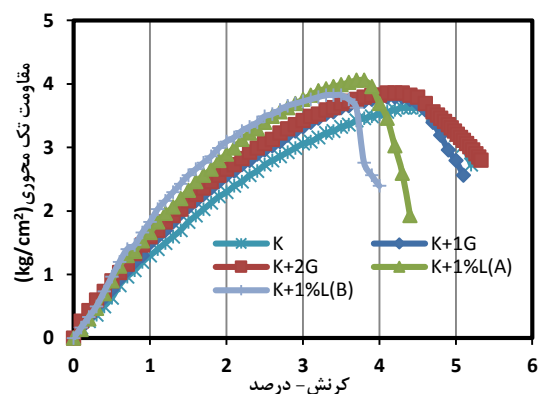
با مقایسه رفتار نمونه‌های تثبیت نشده با نمونه‌های تثبیت شده با ۱ درصد آهک پس از زمان‌های عمل‌آوری مختلف و مشاهده انطباق نسبی نمودارهای تنش-کرنش این نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تثبیت خاک با ۱ درصد آهک یا تسلیح خاک با لایه‌های ژئوگرید تاثیری در میزان مقاومت فشاری محدود نشده و روند افت مقاومت پس از مقاومت نهایی ندارند.

شکل ۱۰ کرنش گسیختگی نمونه‌های رس تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و بدون عامل تسلیح و تثبیت و

سختی بالای ژئوگرید و مقاومت نسبتاً زیاد آن در مقایسه با خاک باعث گردیده که شکست در سطح تماس خاک و ژئوگرید قبل از ایجاد کشش و تغییر شکل در لایه تسلیح و بسیج شدن مقاومت کششی این عوامل به وقوع بپیوندد. از آنجایی که مقاومت کششی عوامل تسلیح ژئوستنتیکی نیاز به تغییر شکل دارد، تثبیت خاک با آهک و بنابراین صلب شدن نمونه‌ها باعث کاهش تغییر شکل‌ها و در نتیجه عدم مشارکت آنچنانی این عوامل در افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. رفتار مشاهده شده بیانگر آن است که اندازه نمونه‌ها و لایه ژئوگرید از عوامل تاثیرگذار در رفتار خاک-های مسلح می‌باشد. عامل دیگری که به احتمال بسیار قوی باعث عدم کارایی ژئوگرید در تحقیق حاضر گردیده، ریز بودن ذرات خاک بوده که قادر به اندرکنش و درگیری با المانهای طولی و عرضی ژئوگرید نبوده‌اند.

۴-۴- کرنش گسیختگی

به منظور بررسی اثر ژئوگرید بر شکل‌پذیری نمونه-های تسلیح شده، نمودارهای تنش-کرنش خاک رس و خاک رس مسلح شده با ۱ یا ۲ لایه ژئوگرید و کائولینیت تثبیت شده با ۱ درصد آهک پس از ۱ و ۳۰ روز عمل‌آوری در شکل ۹ آورده شده است. به خوبی می‌توان مشاهده نمود که منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های رس مسلح و غیر مسلح تقریباً منطبق بر یکدیگر بوده و لذا تسلیح خاک تاثیری در میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی نداشته است که این خود دلالت بر عدم به کشش افتادن لایه‌های تسلیح می‌باشد. همچنین روند افت مقاومت در مورد نمونه‌های تسلیح شده نیز با نمونه‌های تسلیح نشده تفاوت قابل توجهی ندارد.



شکل ۹: تغییرات تنش-کرنش نمونه های رس و رس مسلح شده با ۱ و ۲ لایه ژئوگرید

تسلیح خاک رس تثبیت شده ...

تشکیل و گسترش محصولات سیمانی نظیر سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینات می‌باشد.

- تسلیح خاک رس تاثیری در میزان مقاومت فشاری تک محوری، تردی و روند کاهش مقاومت پس از گسیختگی ندارد.

- افزایش زمان عمل‌آوری تا ۱۴ روز تاثیر قابل توجهی بر بهبود مقاومت فشاری تک محوری دارد ولی پس از آن نمونه‌ها تقریباً به حداکثر مقاومت نهایی خود می‌رسند و زمان‌های عمل‌آوری طولانی‌تر تاثیر چندانی بر افزایش مقاومت نمونه‌ها نداشته است.

- اندازه و نوع ژئوگرید نقش بسیار موثری در مشارکت و یا عدم مشارکت در رفتار نمونه‌های تثبیت شده و نشده دارد. نمونه‌های با ابعاد کوچک قادر به ایجاد شرایط لازم برای انتقال تنش‌های کششی به عوامل تسلیح و بنابراین بسیج نمودن مقاومت کششی این عوامل را فراهم نمی‌کنند. تحت چنین شرایطی مقاومت نمونه‌های کوچک عوامل تسلیح ژئوگرید در مقایسه با خاک بسیار زیاد بوده و بر همین اساس نسبتاً صلب رفتار می‌نمایند.

تسلیح شده با آرایش‌های مختلف ژئوگرید به طور همزمان را برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد با افزایش زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در مقادیر کرنش کمتری به گسیختگی می‌رسند یا به عبارت بهتر تردی با زمان عمل‌آوری نسبت مستقیم دارد. عوامل تسلیح ژئوگرید نقش موثری در افزایش شکل‌پذیری و بنابراین کاهش رفتار شکنندگی نمونه‌های تثبیت شده با آهک نداشته است. نتایج تحقیقات Cai و همکاران نیز نشان داده که پس از تثبیت خاک با آهک شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد [۱۳].

۵- نتیجه‌گیری

- مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های رس حاوی ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد آهک با افزایش زمان عمل‌آوری از ۱ تا ۳۰ روز افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی ۱ درصد آهک ناچیز، لیکن مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد آهک بویژه پس از گذشت ۷ روز عمل‌آوری بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت‌های فشاری با گذشت زمان عمل‌آوری، ناشی از ایجاد پیوندهای بین دانه‌ای است. این پیوندها ناشی از

مراجع

- [5] Haeri S. M. and Noorzad R. and Oskoorouchi A. M., "Effect of Geotextiles Reinforced on The Mechanical Behavior of Sand", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.18, pp.385-402, 2000.
- [6] Kabir E. and Davoudi M. H., "Study of Effect of Lime on Uniaxial Compressive Strength of CL-ML Soil Containing Sodium Chloride", *The 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Iran, November 2-3, 2010.
- [7] Nazzal M. and Abu-Farsakh M. and Mohammad L., "Laboratory Characterization of Reinforced Crushed Limestone under Monotonic and Cyclic Loading", *Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 9, September 1, 2007.
- [8] Noorzad R. & Mirmoradi S.H., "Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, pp.3863-392, 2010.
- [9] Rajasekaran G., "Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays", *Ocean Engineering* 32. 1133-1159, 2005.
- [1] Abdi M. R., "Effects of basic Oxygen steel slag (BOS) on strength and durability of kaolinite", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, 2010.
- [2] Al-Rawas A. A. and Hago A.W. and Al-Sarmi H., "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", *Building and Environment* 40, 681-687, 2005.
- [3] Eren S. and Filiz M., "Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material", *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.2473-2480, 2009.
- [4] Guney Y. and Sari D. and Cetin M. and Tunçan M., "Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil", *Building and Environment* 42, 681-688, 2007.

C.S., and Wang, B.J., "Experimental study on the effect of aggregate size on the strength of filled soils", *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 27, No. 12, pp. 1482~1486, **2005**.

[10] Sawwaf M. E., "Lateral Behavior of Vertical Pile Group Embedded in Stabilized Earth Slope", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 10, October 1, **2009**.

[11] Yong R. N. and Ouhadi V. R., "Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils", *Applied Clay Science*, Vol.35, pp.238-249, **2007**.

[12] Yoo C., "Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, pp.279-298, **2001**.

[13] Cai, Y., and Shi, B., and Liu, Z.B., and Tang, [۱۴] بهادری، ه. و معتمدی، ه.، "بررسی تاثیر ژئوگریدها در کاهش نشست ناشی از روانگرایی با استفاده از میز لرزه"، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، **۱۳۸۹**.