

بررسی آزمایشگاهی بهسازی خاک به روش ستون سنگی

امین فلاح کوشکی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دول

نام نویسنده مسئول:

امین فلاح کوشکی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی بهسازی خاک به روش ستون سنگی پرداخته شده است. روش انجام پژوهش آزمایشگاهی بوده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی چهار نوع مصالح مختلف انجام شده تا تأثیر تغییرات مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته روی آن‌ها قابل مقایسه باشد. در این پژوهش ابتدا روش‌های مختلف بهسازی خاک به صورت خلاصه مطرح شده و هر یک به تفکیک شرح داده شده است. در ادامه با جستجو در متون فنی ابتدا پیشینه مطالعات گذشتگان استخراج شده و با بهره‌گیری از نتایج آن‌ها، ایده و علت استفاده از ستون سنگی به عنوان روشی موثر و کارآمد در بهسازی خاک کلید خورده است. بعد از انتخاب روش نامبرده به تشریح روش انجام آزمایش با استاندارد ASTM و روش ارائه شده توسط سازمان آب و فاضلاب پرداخته شده است. همچنین برنامه کلی آزمایش‌ها نیز ارائه شده که در مجموع ۱۰ آزمون PLT روی مصالح مختلف انجام شده است. این آزمایش‌ها روی چهار نوع مصالح خاک، سنگ، بتن و شن انجام شده است. از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده مشخص می‌شود که مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته ستون سنگی نسبت به خاک و مصالح دیگر تفاوت قابل توجهی (حدود ۱/۷ برابر خاک) دارد. در نهایت با توجه به ضعف مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها در طبیعت این روش به‌عنوان روشی موفق و تأثیر گذار روی افزایش مقاومت خاک‌ها و بهسازی آن پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: آزمایشگاه، بهسازی، خاک، ستون سنگی.

مقدمه

گسترش فعالیت‌های ساخت‌وساز در مناطقی که دارای زمین و بستری بحرانی هستند در دوره‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است. به همین دلیل مهندسی خاک نیازمند ابداع روش‌هایی است تا ویژگی‌های خاک این مناطق بحرانی را افزایش دهد. بهسازی جنس خاک موجب کاهش تغییر شکل‌های ناخواسته خاکه‌ای سست می‌شود. بهسازی خاک‌های سست نیازمند استفاده از تکنیک‌های مناسب می‌باشد

تکنیک استفاده از ستون‌های سنگی، یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های ضعیف مانند رس‌ها، سیلت‌ها و ماسه‌های سیلته می‌باشد که کارایی و سازگاری آن با محیط‌زیست ثابت شده است. ساخت ستون سنگی شامل جایگزینی خاک‌های نامناسب با ستونی قائم و فشرده از سنگدانه‌هاست که معمولاً به‌طور کامل به داخل لایه ضعیف نفوذ می‌کند و سختی آن توسط محصورکنندگی ایجادشده توسط تنش جانبی موجود در خاک اطراف تأمین می‌شود. وجود ستون باعث ایجاد یک مصالح مرکب با تراکم‌پذیری کلی کمتر و مقاومت برشی بیشتر از خاک اولیه می‌شود. نشست یکسان ستون و خاک اطراف آن بر اثر اعمال تنش قائم در سطح زمین و سختی بیشتر ستون سنگی نسبت به خاک موجب تمرکز تنش در آن و در نتیجه کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری مجموعه زمین و ستون سنگی می‌شود.

ساخت ستون‌های سنگی به‌عنوان روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست، توانایی بهسازی زمین‌های متشکل از خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده سست را دارند. این روش سال‌هاست که به منظور کاهش نشست، افزایش ظرفیت باربری، کاهش پتانسیل روانگرایی و افزایش سرعت تحکیم زمین‌های سست به کار می‌رود. ستون‌های سنگی نخستین بار در سال ۱۸۳۰ در فرانسه و از سال ۱۹۵۰ به طور گسترده‌ای در کشورهای دیگر استفاده شده است [1]. در ایران این روش برای نخستین بار با استفاده از روش کوبیدنی اجرا و از سال ۱۳۸۳ تکنیک‌های ارتعاشی ساخت ستون‌های سنگی به ایران وارد شد.

با توجه به افزایش ساخت مدارس در سال‌های اخیر و پراکندگی پروژه‌ها در روستاها و محل‌های دارای خاک نامناسب و ضعیف و گاهی دست ریز مخصوصاً در خراسان شمالی و مناطق راز و جرجان و کهنه جلگه مانه و سملقان و ضرورت احداث مدرسه در این مناطق با توجه به اینکه این مناطق حداقل ۲۰۰ کیلومتر دورتر از بجنورد بوده و هزینه اجرای شمع‌های بتنی بسیار بالاست و خاک این مناطق اکثراً ماری و دارای مقاومت ضعیف بوده و سنگ‌های لاشه به‌وفور در منطقه وجود دارد لذا با توجه به اینکه مدارس احداثی در این مناطق پیچ و مهره‌ای و دارای سقف سبک ورق گالوانیزه بوده و سازه‌های سبکی می‌باشند به‌صورت تجربی در این پروژه‌ها بجای شمع بتنی از شمع‌های سنگی با سنگ لاشه و ملات ماسه سیمان به‌صورت غرقابی انجام می‌شود لذا در پژوهش حاضر ظرفیت باربری شمع بتنی، سنگی، شنی و به‌صورت آزمایشگاهی باهم مقایسه شده و نشست‌های متناظر آن نیز محاسبه خواهند شد.

به‌طور خلاصه در موارد زیر باید از روش ستون سنگی استفاده کرد.

- ۱- در خاک‌های آلی میزان رطوبت، اندیس خمیری، تراکم‌پذیری میزان قابل توجهی می‌باشد در نتیجه جلوگیری از نشست در این خاک‌ها بسیار سخت است.
- ۲- در مورد خاک‌هایی با چسبندگی حداقل ۱۵ کیلوپاسکال استفاده از ستون‌های سنگی به‌منظور بهسازی توصیه می‌گردد.
- ۳- اندیس خمیری: اندیس خمیری که با نماد I_p نمایش داده می‌شود بیانگر پتانسیل خاک جهت انقباض، تغییرات حجمی و تورم می‌باشد که حتی با اجرای ستون سنگی قابل کنترل نمی‌باشد. سازمان NHBC در سال ۱۹۸۸ استفاده از ستون‌های سنگی برای خاک‌های دارای اندیس خمیری بالای ۴۰ درصد را ممنوع کرده است.
- ۴- خاک رس: جلوگیری از ته‌نشینی خاک رس در بسیاری از موارد کاری بسیار دشوار است. هنگام اجرا و نصب ستون‌های سنگی سرعت ته‌نشینی خاک رس افزایش می‌یابد. از این رو در زمین‌هایی که خاک رس آن جوان است و کمتر از ۱۰ سال سن دارد استفاده از ستون سنگی توصیه نمی‌گردد.

روش کار

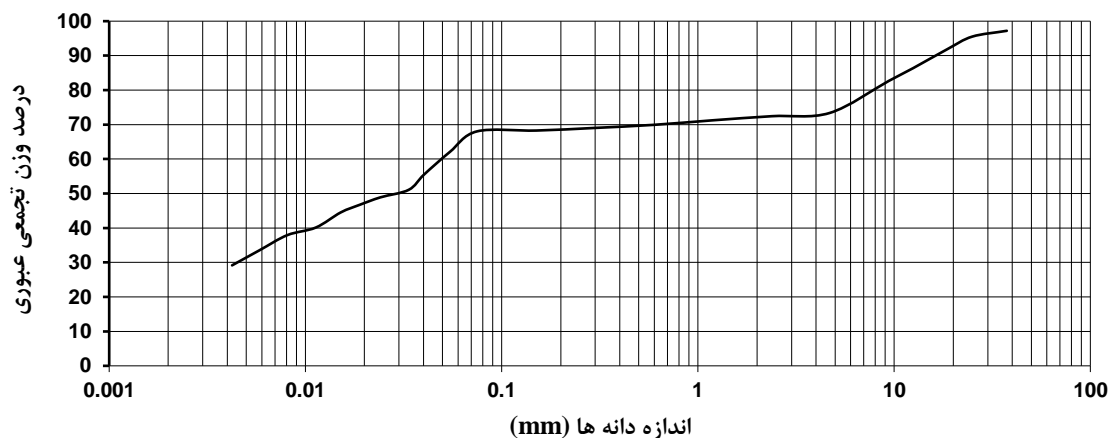
در این پژوهش سعی شده با روش‌های آزمایشگاهی به بررسی عمیق‌تر موضوع بهسازی خاک به روش ستون سنگی پرداخته شود. لذا این مهم مستلزم آن است که ابتدا تحقیقات گذشته به طور کامل بررسی سپس آزمایش‌های بارگذاری PLT با هدف تعیین مدول الاستیسیته و ظرفیت باربری خاک، سنگ و ملات، شن و بتن انجام شود. ستون‌های سنگی بر این روش استوارند که نیروهای وارده را با استفاده از تنش‌های برشی (در سطح تماس ستون با خاک) و باربری نوک ستون، به خاک منتقل می‌کنند. مکانیزم انتقال نیرو (غیر از مواردی که ستون بسیار کوتاه است) توسط بدنه ستون (با استفاده از تورم ستون) به صورت جانبی به خاک اطراف منتقل می‌گردد [2]

مصالح مورد استفاده در پژوهش

در این پژوهش سعی شد بهسازی روی خاک یک پروژه که با مشکل کمبود ظرفیت باربری روبروست انجام پذیرد.

مصالح خاکی

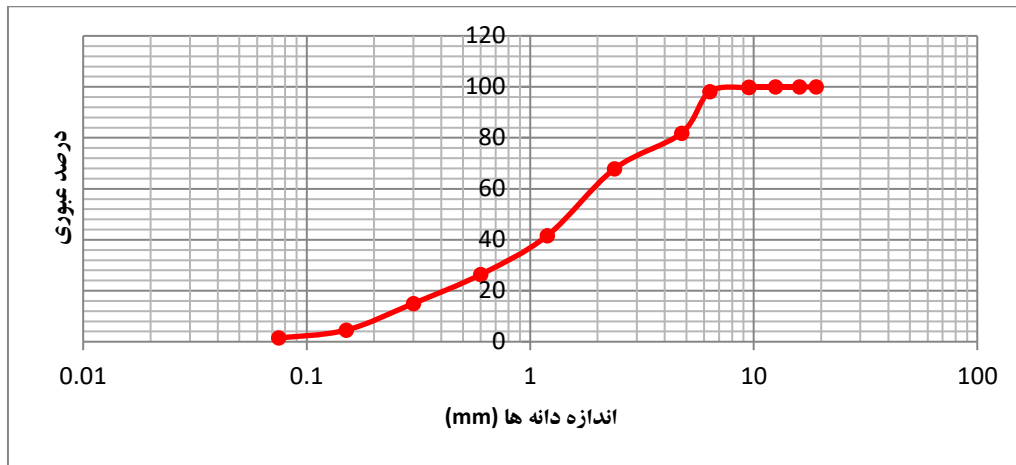
پس از بررسی‌های بعمل آمده روی خاک مشهد، پارکینگ علوم دانشگاه فردوسی مشهد برای انجام مطالعات انتخاب شد. تمام آزمون‌های انجام شده، بر روی این زمین که با خاک دست ریز پر شده است انجام پذیرفته شده تمام گمانه‌ها به قطر ۱۰ تا ۱۳ سانتی‌متر و به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر همانند شکل (۴-۲) حفاری شده و پس از آن با توجه به مصالح نامبرده، پر شده و سپس آزمایش صورت پذیرفته شده است. به منظور طبقه بندی خاک مورد مطالعه، آزمون دانه‌بندی مکانیکی و هیدرومتری با روش استاندارد [3] ASTM D422-87 انجام شده است. در نهایت منحنی دانه‌بندی با ادغام نتایج بخش درشت دانه و ریزدانه خاک به صورت نیمه لگاریتمی در شکل (۴-۳) رسم شده است. و مطابق با استاندارد [4] ASTM D2487 یعنی "دستورالعمل توصیف و شناسایی خاک‌ها" از نوع ML است.



شکل (۱). منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

مصالح بتن

در این پژوهش از بتن با عیار ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده است. نمودار دانه بندی مصالح دانه‌ای بتن مطابق نمودار شکل (۴-۴) می باشد.



شکل (۲). نمودار دانه بندی مصالح دانه‌ای بتن

برنامه آزمایش‌های PLT روی ترکیب مصالح

در این تحقیق برای ارزیابی کیفی مصالح استفاده‌شده، آزمایش‌های متعددی انجام گرفته است که در جدول (۱) برنامه آزمایش‌های را در این تحقیق نشان می‌دهد:

جدول (۱) برنامه آزمایش‌های در این تحقیق

ردیف	مصالح مورد استفاده	آزمایش‌های انجام شده	تعداد	آیین‌نامه
۱	سنگ و ملات	بارگذاری صفحه‌ای	۳	ASTM D1196
۲	بتن	بارگذاری صفحه‌ای	۳	ASTM D1196
۳	خاک	بارگذاری صفحه‌ای	۳	ASTM D1196
۴	شن	بارگذاری صفحه‌ای	۱	ASTM D1196
تعداد کل آزمایش‌ها			۱۰	

بارگذاری صفحه‌ای (PLT)

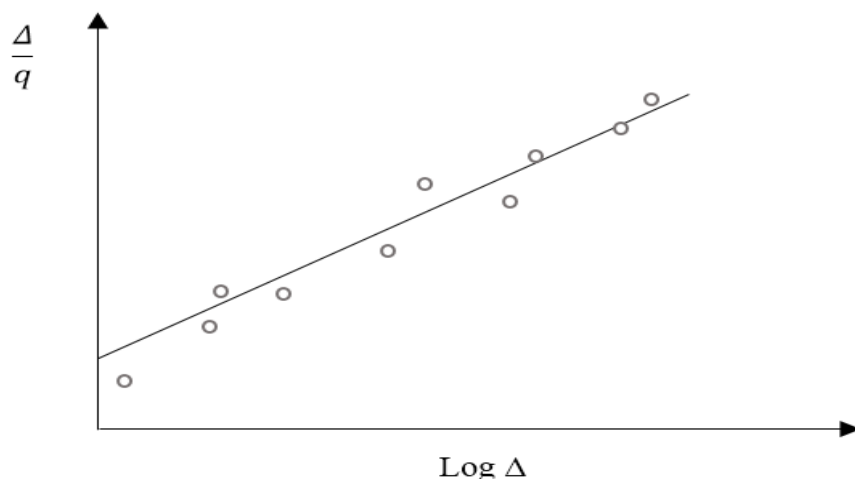
آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی خاک و سنگ نرم، کاربرد روش و تفسیر شامل چگونگی انجام آزمایش، تعیین یافته‌ها و تفسیر یافته‌های آزمایش است. آزمایش، با چیدمان و آرایش‌های گوناگون و همچنین روش‌های بارگذاری متفاوت انجام می‌شود که باید در هر مورد، محدودیت‌ها و جنبه‌های تفسیری آزمایش مورد توجه قرار گیرد. البته ساخت پی با اندازه واقعی و بارگذاری آن، بدون شک بهترین روش تعیین مقاومت زمین است. اما به دو دلیل انجام این کار مطلوب نیست. نخست آنکه بسیار پرهزینه است و دوم آنکه مقاومت زمین فقط برای پی با یک اندازه به دست می‌آید و اگر پی‌های ساختمان، بیش از یک اندازه داشته باشند، نیاز به آزمایش‌های متعدد است. در این شرایط، با انجام آزمایش بر روی یک صفحه کوچک و تعمیم نتایج (با رعایت جوانب لازم)، می‌توان ویژگی‌های موردنظر را به دست آورد.

۱- روش تعیین ظرفیت باربری

روش‌های مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری در متون فنی ارائه شده که در ذیل به برخی از آنها اشاره شده است:

۱-۱- روش chin-kondner

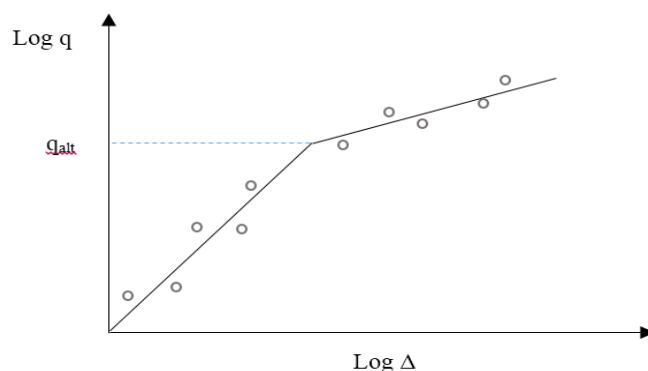
در این روش ابتدا مطابق با شکل (۴-۵) نمودار بار-نشست را رسم می‌شود سپس نمودار نشست/بار-نشست رسم می‌شود و نقاط بدست آمده برازش شده و شیب نمودار همان ظرفیت باربری خواهد بود.



شکل (۴). روش Chin kondner

روش Debeer

در این روش مطابق با شکل (۵) ابتدا نمودار بار-نشست رسم می‌شود و سپس نمودار لگاریتم بار-نشست ترسیم شده و در نقطه شکست نمودار، بار نهایی و نشست نهایی بدست می‌آید.



شکل (۵). روش Debeer

روش ساده شده

که در این روش نمودار بار-نشست رسم می‌شود و محل تقاطع مماس‌های ابتدا و انتهای نمودار ظرفیت باربری نهایی و نشست نهایی بدست می‌آید.

روش Vanweele

در این روش سهم ظرفیت باربری جدار و نوک را جدا می‌کند ولی در بقیه روش‌ها فقط ظرفیت باربری نهایی محاسبه می‌شود. شایان ذکر است در این روش ظرفیت باربری نهایی قابل محاسبه نیست. در این پژوهش با توجه به اینکه هدف محاسبه و مقایسه ظرفیت باربری شم‌های با مصالح مختلف است لذا برای محاسبه ظرفیت باربری از روش ساده‌شده استفاده شده است.

هدف

هدف از این آزمایش، کمک به تعیین پارامترهای مهمی مانند مدول یانگ، ضریب عکس‌العمل بستر و مقاومت مجاز مصالح آزمایش‌شده و در نهایت تعیین مقاومت زمین هنگام ساخت پی است. اما در این پژوهش هدف اصلی بدست آوردن مدول یانگ و مقاومت مجاز بوده است.

آماده‌سازی آزمایش

پیش از شروع هر مطالعه کارگاهی در زمینه بارگذاری صفحه‌ای، باید همه جک‌ها، فشارسنج‌ها و مابقی وسایل کنترل شوند. اطمینان کامل از کارکرد درست گیج‌ها پیش از شروع هر آزمایش، ضروری است.

آماده‌سازی محل آزمایش

در آزمایش‌هایی که روی خاک و رس یا سنگ نرم انجام می‌شود، محل آزمایش باید به‌طور کامل دست‌نخورده باشد. در این تحقیق، سطح آزمایش با گیج و ملات سیمان صاف شده است. اگر سطح مورد آزمایش بسیار سخت باشد، استفاده از لایه‌های متعدد گیج یا ملات سیمان برای به‌دست آوردن سطح کاملاً صاف ضروری است. در آزمایش‌هایی که روی سطح افقی انجام می‌شود، می‌توان از لایه نازکی از ماسه نرم و یکنواخت نیز استفاده کرد که در این صورت، ضخامت آن اغلب یک تا دو سانتی‌متر است و در مواردی که دانه‌های درشت نیز در مصالح مورد آزمایش دیده شود، این مقدار تا پنج سانتی‌متر قابل‌افزایش است.

روش انجام آزمایش

برای جلوگیری از دست‌خوردگی زمین زیر صفحه، می‌توان پیش از بارگذاری اصلی، چند بارگذاری تناوبی سریع با فشارهای کم اعمال کرد.

بارگذاری، در پله‌های مختلف انجام می‌گیرد. مقدار بار و مدت بار در هر پله و بسیاری از نکات دیگر می‌تواند بر اساس نیاز طراح پی، مدل‌سازی بار وارد بر پی، و یا نوع مصالح مورد آزمایش انجام گیرد. در این تحقیق بارگذاری پله‌ای بوده، که فشار نهایی به‌صورت مضربی از مقاومت مجاز، پیش‌بینی و تعیین شده است. سپس ۱۰ پله مساوی بارگذاری تا رسیدن به با نهایی انجام می‌گیرد. مدت‌زمان نگاه‌داشتن بار در هر پله بار باید یکسان باشد. این مدت، در حدود هشت دقیقه بوده است. در هر حال، این روش باید شرایط بارگذاری زهکشی شده را فراهم کند. هر پله بار، ۰/۱ ظرفیت نهایی پیش‌بینی شده خاک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل (۶) بارگذاری صورت گرفته شده است. گیج داخل حلقه نیرو دقتی برابر ۰/۰۱ میلی‌متر دارد که با استفاده از جک ۵۰ تنی بارگذاری شده است.



شکل (۶). نحوه بارگذاری صفحه‌ای

طرح اختلاط

در این تحقیق از طرح اختلاطهایی با مصالح گوناگون استفاده شده که با توجه به آن آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای صورت گرفته شده است. این طرح‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲). طرح اختلاطهای استفاده شده

ردیف	مصالح	آزمایش
۱	بتن با عیار ۱۵۰ کیلوگرم سیمان	بارگذاری صفحه‌ای (PLT)
۲	سنگ شکسته	بارگذاری صفحه‌ای (PLT)
۳	خاک‌های دست ریز	بارگذاری صفحه‌ای (PLT)
۴	سنگ شکسته با دوغاب سیمان	بارگذاری صفحه‌ای (PLT)

به علت استفاده از مصالح مختلف برای آزمایش، نحوه عمل‌آوری برای طرح‌های اختلاط مختلف، با توجه به نوع مصالح مورد استفاده شده یکسان بوده است. تمام ستون‌ها پس از گذشت چهار روز از ساختشان، آزمایش بر روی آن‌ها صورت گرفته شده است.

نحوه ساخت ستون‌ها

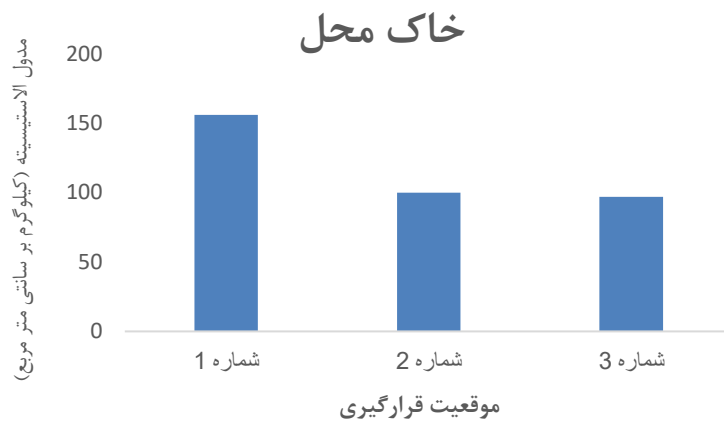
نحوه ساخت ستون‌ها بدین صورت بوده که در ابتدا یک چاله به قطر ۱۰ الی ۱۳ سانتی‌متر و به عمق ۵۰ سانتی‌متر حفاری شده، سپس مصالح موجود را همانند شکل (۷) به صورت ۵ لایه ریخته و متراکم شده است.



شکل (۷) نحوه متراکم کردن مصالح درون ستون‌ها

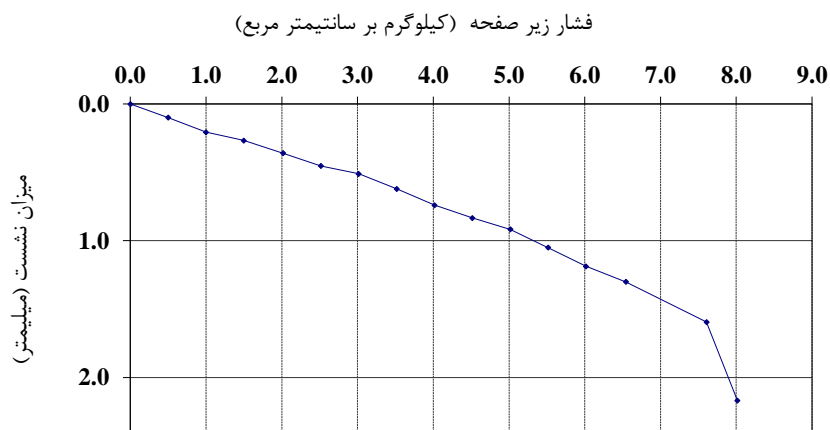
یافته‌ها

مقاومت خاک دست‌ریز در محل پروژه

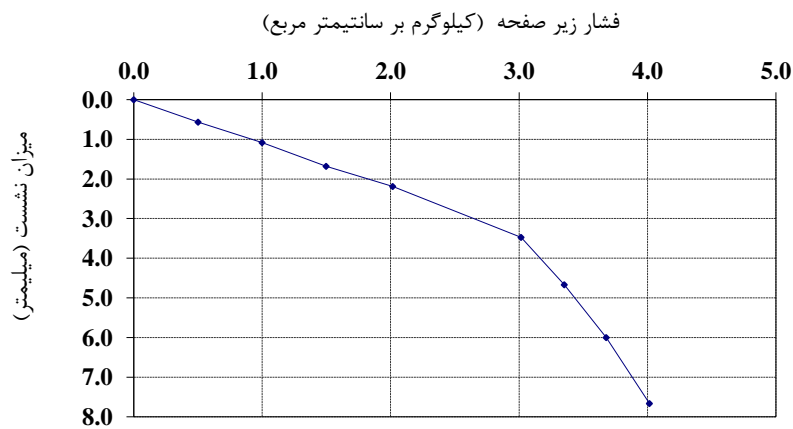


شکل (۸). نتایج مدول الاستیسیته خاک محل

با توجه به شکل (۸)، مدول الاستیسیته تقریباً معادل ۱۱۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده که نشان دهنده مدول الاستیسیته پایین مصالح را از خود نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹)، میزان ظرفیت باربری نهایی و نشست خاک دست ریز نشان داده شده است.



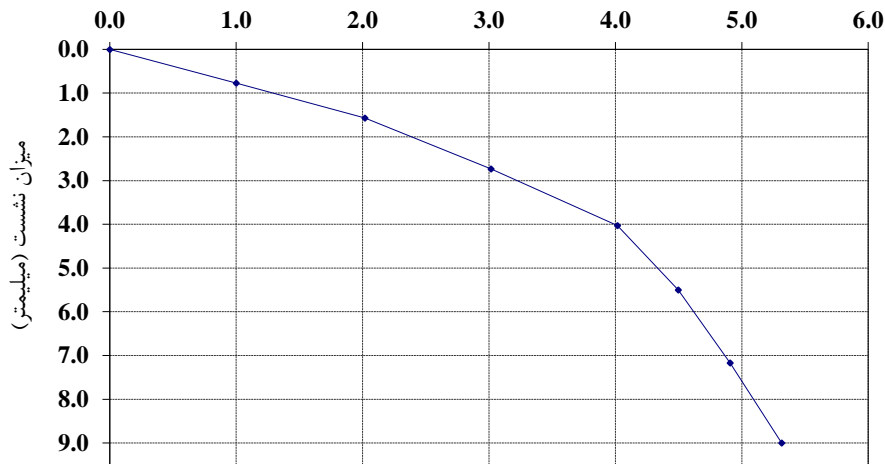
(الف)



(ب)

شکل (۹) نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی خاک محل؛ الف) موقعیت یک، ب) موقعیت دو و پ) موقعیت سه

فشار زیر صفحه (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)



(پ)

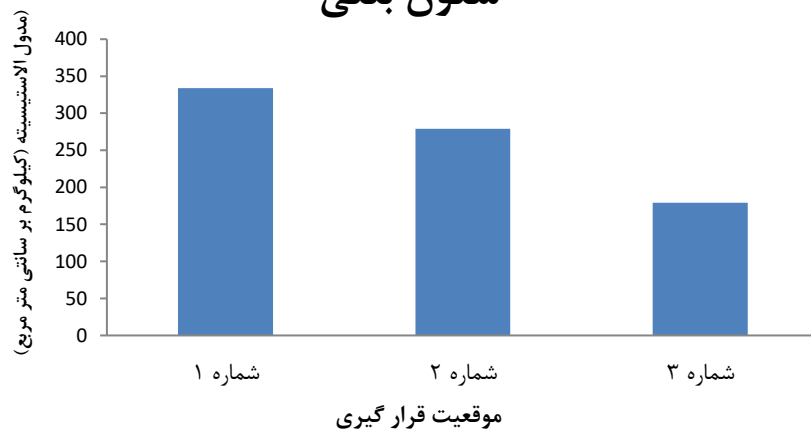
شکل (۱۰) (ادامه) نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی خاک محل؛ الف) موقعیت یک، ب) موقعیت دو و پ) موقعیت سه

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، میانگین تنش مجاز معادل ۲/۲۶ کیلوگرم بر سانتی مربع و همچنین میانگین نشست معادل ۲/۹۳ میلی‌متر می‌باشد.

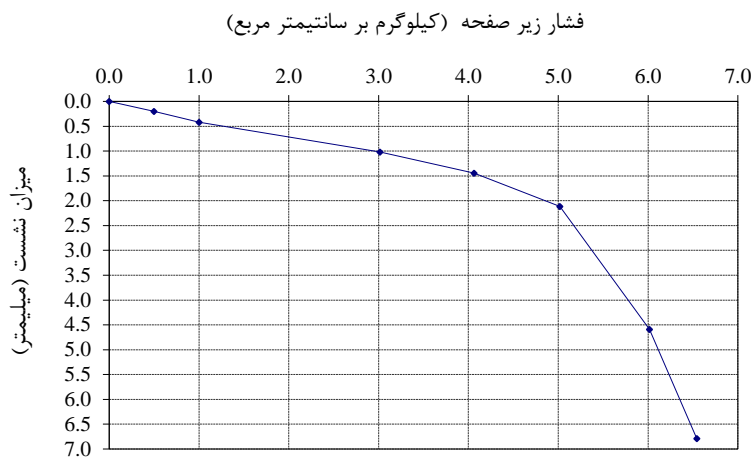
ستون بتنی

با توجه به شکل (۱۱)، مدول الاستیسیته تقریباً معادل ۲۶۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده که نشان‌دهنده افزایش مدول الاستیسیته نسبت به خاک محل می‌باشد. با توجه به شکل (۱۲)، میزان ظرفیت باربری نهایی و نشست خاک دست ریز نشان داده شده است.

ستون بتنی

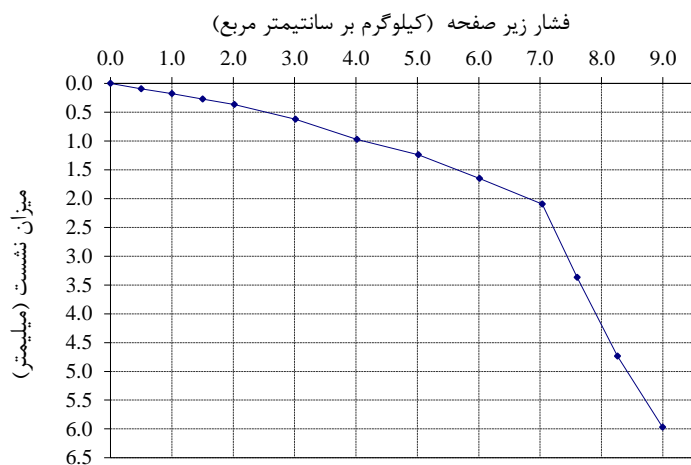


شکل (۱۱). نتایج مدول الاستیسیته ستون بتنی

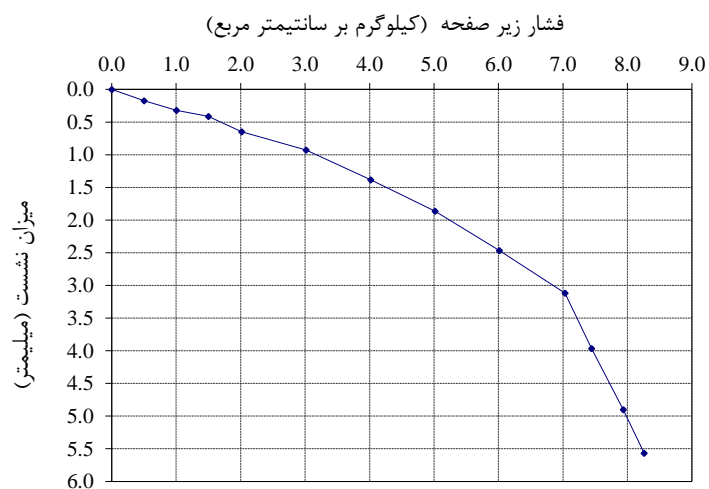


(الف)

شکل (۱۲). نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی بتن؛ الف) موقعیت یک، ب) موقعیت دو و پ) موقعیت سه



(ب)



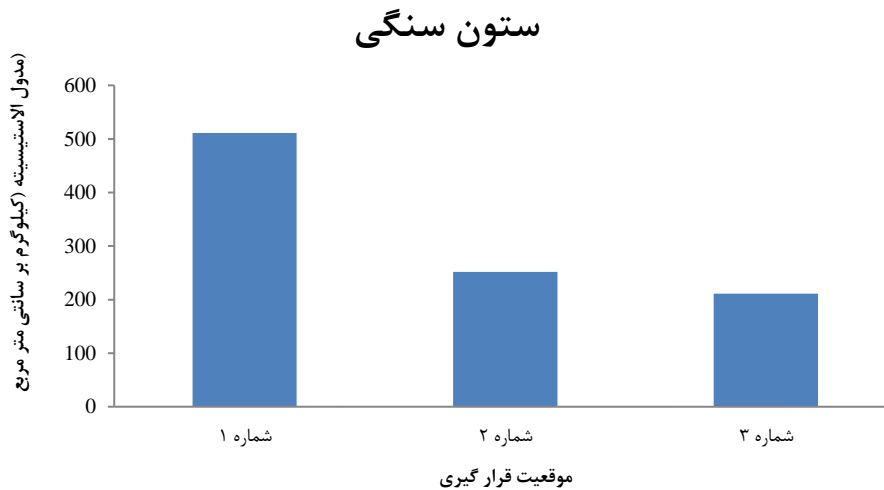
(پ)

شکل (۱۳). (ادامه) نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی بتن؛ الف) موقعیت یک، ب) موقعیت دو و پ) موقعیت سه

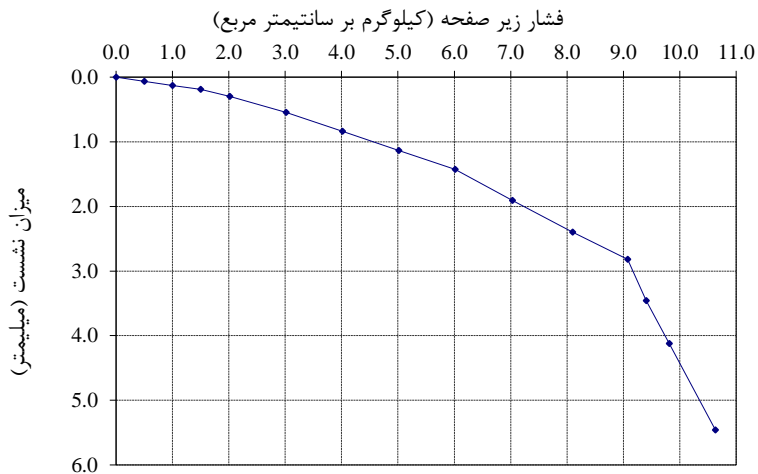
همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، میانگین تنش مجاز معادل ۳/۱۷ کیلوگرم بر سانتی مربع و همچنین میانگین نشست معادل ۲/۴۳ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با استفاده از ستون بتنی ظرفیت مقاومت فشاری افزایش یافته، همچنین میزان نشست کاهش پیدا نموده است.

ستون سنگی

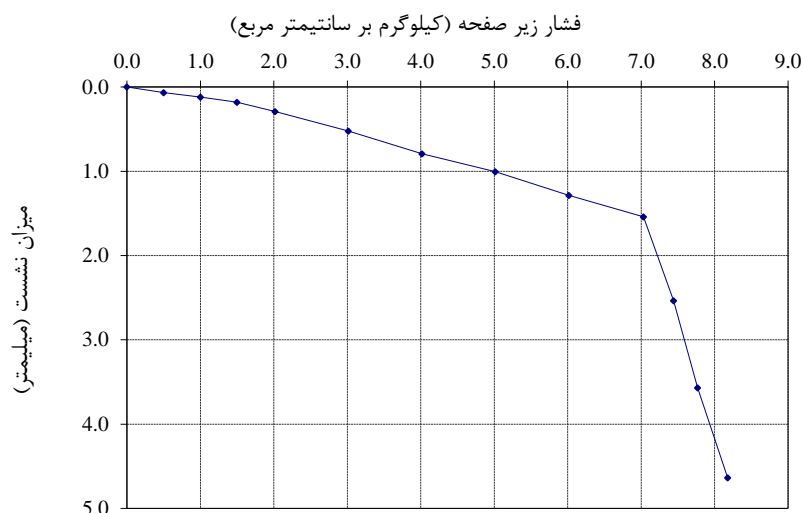
با توجه به شکل (۱۴)، مدول الاستیسیته تقریباً معادل ۳۲۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده که نشان‌دهنده افزایش مدول الاستیسیته این مصالح نسبت به ستون بتنی و خاک محل بوده است. با توجه به شکل (۵-۶)، میزان ظرفیت باربری نهایی و نشست ستون سنگی را نشان داده است.



شکل (۱۴). نتایج مدول الاستیسیته ستون سنگی

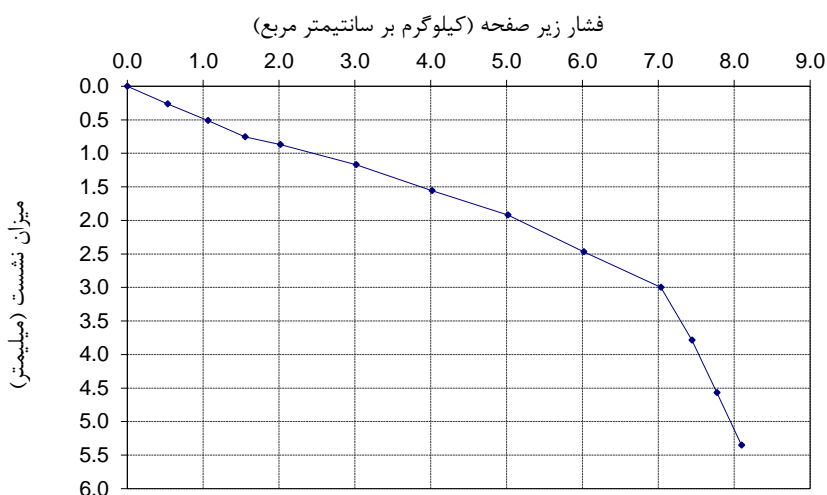


(الف)



(ب)

شکل (۱۵). نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی ستون سنگی؛ الف) موقعیت یک، ب) موقعیت دو و پ) موقعیت سه



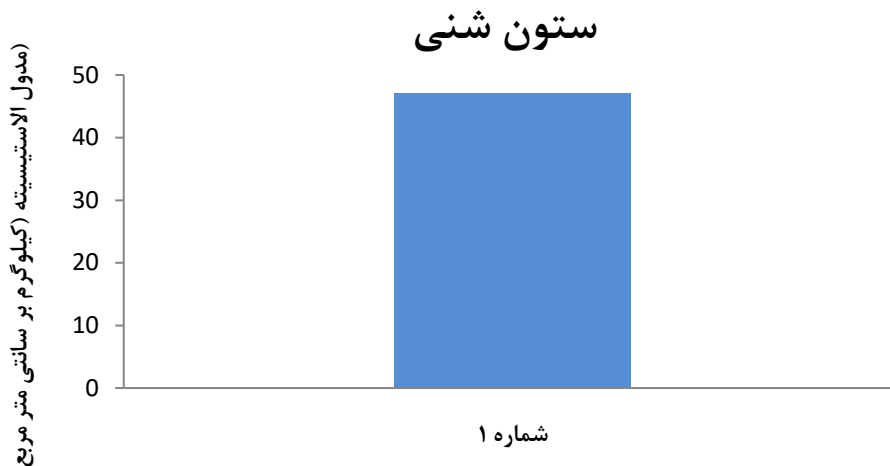
(پ)

شکل (۱۶). (ادامه) نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی ستون سنگی؛ الف) موقعیت یک، ب) موقعیت دو و پ) موقعیت سه

همان‌طور که در شکل (۵-۶) نشان داده شده است، میانگین تنش مجاز معادل $3/86$ کیلوگرم بر سانتی مربع و همچنین میانگین نشست معادل $2/40$ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با استفاده از ستون سنگی ظرفیت مقاومت فشاری افزایش نسبت به خاک محل و ستون بتنی یافته، همچنین میزان نشست نسبت به خاک محل کاهش پیدا نموده است.

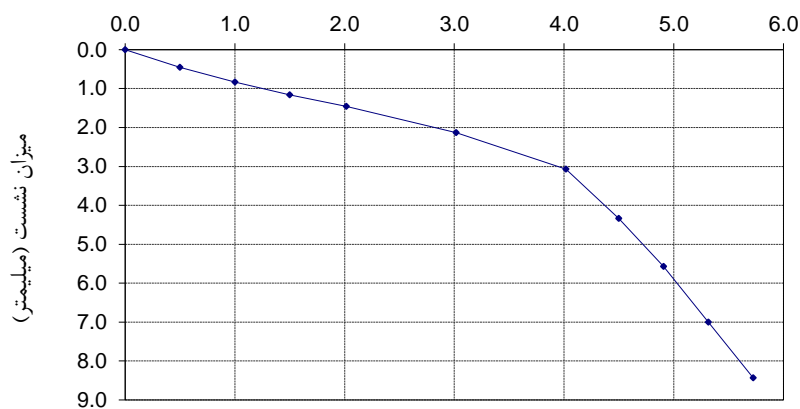
ستون شنی

با توجه به شکل (۱۷)، مدول الاستیسیته تقریباً معادل 45 کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده که نشان‌دهنده کاهش مدول الاستیسیته این مصالح نسبت به خاک محل بوده است. با توجه به شکل (۵-۸)، میزان ظرفیت باربری نهایی و نشست ستون شنی را نشان داده است.



شکل (۱۷). نتایج مدول الاستیسیته ستون شنی

فشار زیر صفحه (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)



شکل (۱۸). نتیجه آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی ستون شنی

همان‌طور که در شکل (۱۸) نشان داده شده است، میانگین تنش مجاز معادل $2/01$ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و همچنین میانگین نشست معادل $3/07$ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با استفاده از ستون شنی ظرفیت مقاومت فشاری و نشست چندان تغییری نسبت به خاک محل نیافته است.

نتیجه گیری

خلاصه ای از نتایج بدست آمده از فعالیت‌های آزمایشگاهی صورت گرفته، به شرح زیر می‌باشد:

- مدول الاستیسیته بدست آمده از ستون‌های سنگی، از دیگر ستون‌ها بیشتر می‌باشد.
- حداکثر ظرفیت باربری بدست آمده از ستون‌ها، ستون سنگی می‌باشد.
- کمترین نشست بدست آمده، از ستون‌های سنگی می‌باشد.
- استفاده از ستون‌های بتنی و سنگی، باعث افزایش ظرفیت باربری، مدول الاستیسیته و همچنین کمتر شدن نشست نسبت به خاک دست ریز می‌شود.
- استفاده از ستون‌های شنی، شرایط خاک دست ریز را بهتر نمی‌کند.

- با توجه به نتایج بیان شده در فصول قبل استفاده از زمین‌های که دارای خاک دست ریز می‌باشد، می‌تواند به‌طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه این تحقیق موضوعات زیر قابل بررسی و پیشنهاد می‌باشند:
- اثر تثبیت‌کننده‌های مانند سیمان، قیر و یا امولسیون قیر، آهک به همراه رس نیز بر روی ستون‌های سنگی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.
- انجام آزمایش‌های تکمیلی و پیشرفته نظیر تعیین مدول بر جهندگی مصالح، مدول ارتجاعی و پارامترهای مقاومتی در آزمایش سه محوری.
- بررسی اثرات جوی بر روی ستون‌های سنگی و غیر سنگی و نیز بررسی دوام در مقابل سیکل‌های بالای یخ زدن و ذوب شدن.
- یکی از مهم‌ترین بررسی‌ها و آزمایش‌ها بر روی این ستون، استفاده و کاربرد آن‌ها در محل استفاده یعنی لایه‌های روسازی می‌باشد. با این کار و استفاده از ابزار دقیق می‌توان عملکرد کوتاه‌مدت و درازمدت این مصالح را در محل، مورد ارزیابی قرارداد و نیز رفتار واقعی آن‌ها را در هنگام بارگذاری‌های دوره‌ای و تکراری ترافیکی تعیین نمود.
- تثبیت ستون‌های سنگی به وسیله فن آوری نانو.

منابع و مراجع

- [1] Etezzad, M., Hanna, A.M. and Ayadat. T. (2006) "Bearing Capacity of Groups of Stone Columns", Proceedings of the 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Graz, pp. 781-786.
- [2] McCabe, B.A., McNeill, J.A., and Black, J.A. (2007) Ground Improvement Using The Vibor-stone Column Technique. Presented at the Joint meeting of Engineers Ireland West Region and the Geotechnical Society of Ireland, NUI Galway
- [3] ASTM Standard D422-63, 2007, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils" Annual book of ASTM standards, Philadelphia, PA.
- [4] ASTM Standard D2487-11, 2011, "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)" Annual book of ASTM standards, Philadelphia, PA.