



بهبود کارایی ستون‌های سنگی اجرا شده به روش جایگزینی دینامیکی با اندازه‌گیری‌های محلی

سحر ترابی^۱، سعید عسکریان^۲، علی فاخر^۳

ایران، تهران، اتوبان کردستان، نبش خیابان هفدهم، شرکت مهندسی مشاور هندسه پارس
s.torabi@parsgc.com

خلاصه

ستون سنگی یکی از روش‌های بهسازی زمین برای مقابله با معضلاتی از قبیل روانگرایی یا نشست بیش از حد مجاز است. یکی از روش‌های ایجاد ستون‌های سنگی در خاک استفاده از روش جایگزینی دینامیکی است. این روش، ترکیبی از روش تراکم دینامیکی و روش جایگزینی مصالح است. به منظور ایجاد ستون سنگی به روش جایگزینی دینامیکی، حفره‌های ایجاد شده در اثر ضربات تراکم دینامیکی با مصالح سنگی پر می‌شود و با ادامه ضربات، مصالح سنگی در خاک سست ایجاد یک ستون سنگی می‌نماید. در این مقاله مطالعه موردی این روش در دو پروژه واقعی ارائه شده است و راهکارهای به دست آمده برای بهبود کارایی این روش براساس اندازه‌گیری‌های محلی شرح داده می‌شود. پروژه اول مربوط به طرح بهسازی زیر ساختمان‌ها در سایت احداث آب‌شیرین کن سافی کوثر بندرعباس به منظور مقابله با روانگرایی بستر می‌باشد. پروژه مورد بررسی دوم مربوط به تراکم و بهسازی مصالح استحصالی در پسرانه بندر شهید بهشتی چابهار بوده است. در این پروژه‌ها به دلیل وجود پتانسیل روانگرایی در خاک لای بدون پلاستیسیته، بهسازی به روش جایگزینی دینامیکی انتخاب شد. در اجرای اولیه طرح بهسازی، عمق نفوذ ستون‌ها و مقادیر نفوذ استاندارد خاک بین ستون‌ها با مقادیر طراحی شده فاصله داشت و پاسخگوی نیازهای طرح نبود. پس از اجرای آزمایشی با توجه به مشاهدات و اندازه‌گیری‌های انجام شده تغییراتی نظیر اجرای چند مرحله‌ای ضربات در هر نقطه با رعایت فاصله زمانی، اندازه‌گیری بالادگی^۴ خاک اطراف ستون و توقف عملیات کوبش در صورت مشاهده بالادگی بیش از حد، اصلاح دانه‌بندی مصالح سنگی، کنترل عدم انحراف ضربات از راستای قائم و حذف حفاری اولیه گودال، در جهت محور فشار آب حفره‌ای اضافی و همچنین بهبود کارایی ضربات در روش اجرا اعمال گردید که موجب افزایش نفوذ ستون‌های سنگی و افزایش تراکم خاک مابین ستون‌ها شد. در نهایت نتیجه‌گیری شد که پایش‌های صورت گرفته و اصلاحات انجام شده تاثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد و بازده اجرای ستون‌های سنگی به روش تراکم دینامیکی دارد و برای پروژه‌های اجرایی توصیه می‌گردد.

کلمات کلیدی: ستون سنگی، جایگزینی دینامیکی، اندازه‌گیری محلی بهسازی، روانگرایی، طرح بهسازی آزمایشی.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های حل مشکل روانگرایی اجرای ستون‌های سنگی می‌باشد. ستون‌های سنگی علاوه بر روش‌های معمول با دستگاه‌های مختص این روش می‌تواند به روش جایگزینی دینامیکی اجرا شود. در این روش که ترکیبی از روش‌های تراکم دینامیکی و جایگزینی است، حفره‌های ایجاد شده با ضربات تراکم دینامیکی با مصالح دانه‌ای مناسب پر می‌شود به طوری که در نهایت ستون‌هایی از مصالح دانه‌ای در خاک ایجاد می‌شود. اولین حفره با توجه به وضعیت خاک می‌تواند با ضربه تراکم دینامیکی و یا حفاری ایجاد شود. یکی از موانع اثربخشی روش تراکم دینامیکی وجود خاک ریزدانه و افزایش فشار آب حفره‌ای بر اثر ضربات می‌باشد. راهکارهای مختلفی برای تسریع محور فشار آب حفره‌ای اضافی و افزایش کارایی روش تراکم دینامیکی پیشنهاد شده است. در این تحقیق چند راهکار عملی براساس دو مورد مطالعه موردی در پروژه‌های واقعی ارائه شده است.

^۱ کارشناس ژئوتکنیک

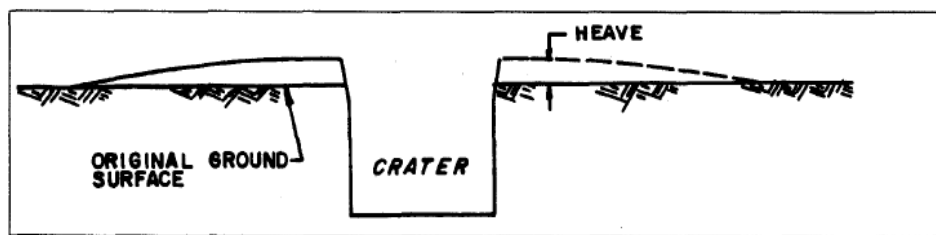
^۲ سرپرست گروه ژئوتکنیک

^۳ مدیریت مهندسی

۲. پیشینه تحقیق

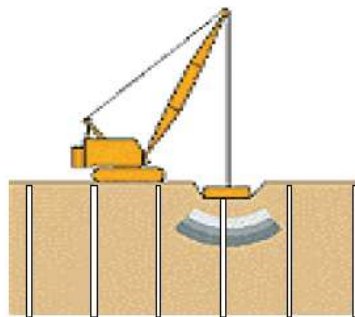
بهسازی خاک به وسیله تراکم دینامیکی روشی مرسوم و اقتصادی برای بهسازی خاک دانه‌ای به حساب می‌آید. در خاک دارای ریزدانه کارایی روش تراکم دینامیکی به دلیل افزایش فشار آب حفره‌ای کاهش می‌یابد. برخی راهکارهای افزایش کارایی در تحقیقات مختلف برای روش تراکم دینامیکی ارائه شده‌است. برخی از این راهکارها در ادامه براساس تحقیقات انجام شده مطرح می‌گردد.

یکی از راهکارهای محو فشار آب حفره‌ای اجرای ضربات در چند مرحله با ایجاد فاصله زمانی می‌باشد. به این منظور لازم است بالازدگی سطح زمین در زمان کوبش پایش گردد (شکل ۱) و در صورت ایجاد بالازدگی در اطراف محل ضربه، عملیات کوبش تا محو فشار آب حفره‌ای متوقف گردد. این زمان با توجه به نفوذپذیری خاک موردتراکم می‌تواند بین چند روز تا ۲ هفته متغیر باشد [۱] و [۲].



شکل ۱ - وقوع بالازدگی در اطراف محل کوبش [۱]

اجرای زهکش‌های عمودی یکی دیگر از روش‌های افزایش سرعت محو فشار آب حفره‌ای اضافی می‌باشد. زهکش‌های عمودی معمولاً به صورت لوله‌های با قطر کم و سوراخ‌دار در یک شبکه متراکم در محدوده کوبش اجرا می‌گردد و به زهکشی آب در زمان کوبش و تراکم خاک کمک می‌نماید [۱] و [۳].



شکل ۲ - استفاده از زهکش قائم همراه به تراکم دینامیکی [۴]

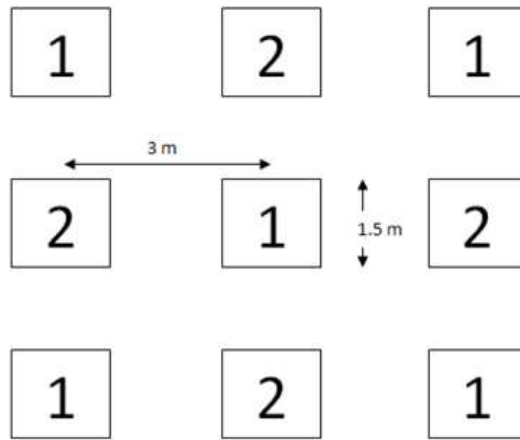
از دیگر راهکارهای افزایش بازده روش‌های بهسازی مبتنی بر تراکم خاک مانند روش تراکم دینامیکی و جایگزینی دینامیکی در خاک دارای ریزدانه اجرای سازه‌ها و بهره‌برداری در فاصله زمانی قابل توجه نسبت به زمان اجرای بهسازی می‌باشد. تحکیم مصالح و افزایش پارامترهای مقاومتی در مصالح دارای ریزدانه با گذشت زمان از عملیات تراکم، به صورت قابل توجهی مشاهده شده‌است. این افزایش بسته به زمان از ۱۵ تا ۲۰۰ درصد می‌تواند اتفاق افتد [۵].

همان‌طور که ذکر گردید تحقیقات انجام شده اغلب در خصوص بهسازی به روش تراکم دینامیکی می‌باشد. در این تحقیق برخی از این راهکارها به همراه چند مورد دیگر در اجرای ستون شنی به روش جایگزینی دینامیکی بررسی شده‌است. با مطالعه موردی راهکارها در پروژه‌های واقعی کارایی آن‌ها به صورت دقیق‌تری مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. معرفی مطالعات موردی

مطالعه موردی اول مربوط به پروژه ساخت آب‌شیرین‌کن ساقی کوثر در بندرعباس است. در این پروژه بستر سایت به طور غالب از جنس لای بدون پلاستیسته می‌باشد. براساس تحلیل پتانسیل روانگرایی مشخص شد بستر در بخش زیادی از نقاط سایت دارای پتانسیل روانگرایی می‌باشد. بهسازی بستر

برای مقابله با روانگرایی در محل ساختمان‌های موجود در سایت براساس مقایسه فنی و اقتصادی روش‌های بهسازی و با روش جایگزینی دینامیکی طراحی گردید. طرح بهسازی در محل ساختمان‌ها مطابق شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳ - طرح بهسازی محل ساختمان‌های سایت آب شیرین کن ساقی کوثر با روش جایگزینی دینامیکی

به منظور اجرای طرح جایگزینی دینامیکی مطابق شکل ۱، در ابتدا گودالی به عمق حدود ۱ متر حفر شده و با مصالح درشت دانه پر شد. سپس کوبش طبق الگوی ارایه شده شروع شده و گودال ایجاد شده به وسیله ضربات با مصالح دانه‌ای پر گردید (شکل ۴). پس از اجرای محدوده‌ی آزمایشی براساس الگوی مذکور گمانه‌ای بر روی یکی از ستون‌ها حفاری شد تا مقدار نفوذ مصالح در خاک اندازه‌گیری و با مقدار طراحی شده برابر ۵ متر مقایسه شود. پس از حفر گمانه مشخص شد نفوذ مصالح در محل کوبش به اندازه ۲ متر ایجاد شده است.



شکل ۴ - اجرای ستون شنی به روش تراکم دینامیکی در محل پروژه آب شیرین کن ساقی کوثر

مطالعه موردی دوم مربوط به پروژه توسعه بندر شهید بهشتی چابهار می باشد. در طرح توسعه بندر پس از احداث یک دایک سنگی در اطراف محدوده موردنظر برای استحصال، مصالح لایروبی به منظور استحصال زمین داخل دایک ریخته شده است. سپس بهسازی بستر به روش تراکم دینامیکی در محدوده استحصالی اجرا گردیده است. در بخش هایی از محدوده استحصالی به خصوص در نزدیکی اطراف دایک به دلیل وجود مصالح ریزدانه طرح تراکم دینامیکی به تنهایی پاسخگوی نیازهای طرح برای رفع مشکل روانگرایی نبود. ارتفاع مصالح لایروبی در بعضی از این نقاط به ۱۰ متر نیز می- رسید در نتیجه تا عمق ۱۰ متری خاک بایستی به تراکم لازم برای مقابله با روانگرایی برسد. در نتیجه از روش ستون شنی به وسیله ی جایگزینی دینامیکی در این بخش ها استفاده شده است (شکل ۵).



شکل ۵- اجرای ستون شنی به روش تراکم دینامیکی در محل بندر شهید بهشتی چابهار

در مرحله نخست اجرای طرح جایگزینی دینامیکی با مصالح شنی و در یک مرحله کوبش انجام شد و پس از اجرای این روش در یک محدوده، گمانه ای برای کنترل میزان بهسازی در محدوده مورد تراکم حفاری گردید. با اجرای گمانه مشخص شد تراکم مصالح در لایه های بالایی خاک لایروبی به خوبی انجام شده است در حالی که در لایه های زیرین تراکم بسیار کم است. نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در گمانه مذکور در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- نتایج آزمایش نفوذ استاندارد پس از اجرای جایگزینی دینامیکی

عدد نفوذ	تعداد ضربات مراحل نفوذ			عمق (متر)
	۱۵ سانتی متر سوم	۱۵ سانتی متر دوم	۱۵ سانتی متر اول	
۹	۵	۴	۳	۱
۱۱	۶	۵	۳	۲
۴۰	۲۲	۱۸	۱۳	۳
۲۶	۱۶	۱۰	۹	۴
۲۳	۱۳	۱۰	۵	۵
۵	۳	۲	۳	۶
۱۶	۱۱	۵	۳	۷
۱۰	۷	۳	۲	۸
۱۱	۶	۵	۳	۹
۶	۳	۳	۳	۱۰

۴. بررسی راهکارهای بهبود کارایی ستون‌های سنگی

در جایگزینی دینامیکی اجرا شده در سایت آب‌شیرین کن بندرعباس به دلیل بالا رفتن فشار آب حفره‌ای در زمان کوبش، مصالح دانه‌ای در خاک بستر نفوذ نکردند و نتایج بهسازی مطابق با طرح به دست نیامد. در نتیجه تغییراتی در روش اجرا به شرح زیر انجام شد:

- عملیات کوبش در هر نقطه در دو مرحله با ایجاد فاصله زمانی در حدود ۳ تا ۵ روز اجرا گردید. با این روش زمان لازم برای محو اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک پس از مرحله اول کوبش تامین شده و ضربات در مرحله دوم مجدداً منجر به تراکم خاک و نفوذ مصالح دانه‌ای در خاک می‌گردد. به منظور توقف ضربات در مرحله اول، پایش اطراف محل کوبش تا مشاهده بالازدگی خاک به عنوان نشانه‌ای برای بالا رفتن فشار آب حفره‌ای انجام شد.
- در این پروژه پیش از شروع ضربات گودالی به وسیله بیل مکانیکی حفاری و مصالح دانه‌ای در آن ریخته می‌شد. سپس عملیات کوبش آغاز می‌گردید. این روش باعث ایجاد یک لایه‌ی متراکم از مصالح دانه‌ای می‌شد که بخش زیادی از انرژی کوبش را مستهلک می‌نمود. با حذف این گودال و ایجاد حفره با اولین ضربه و سپس ریختن مصالح سنگی امکان تراکم بهتر در مصالح ایجاد گردید.
- با بررسی عملیات کوبش و اجرای ستون سنگی در فاز آزمایشی اولیه مشخص شد که برخی ضربات با انحراف از راستای قائم بر نقطه کوبش وارد شده‌است. این ضربات منجر به پخش شدن مصالح در اطراف محل کوبش شده و در نتیجه از نفوذ عمودی مصالح در خاک به طور موثر جلوگیری می‌نماید.

با ایجاد این تغییرات در روش اجرا، عملیات کوبش و سپس گمانه‌زنی مجدداً تکرار گردید. نتایج گمانه‌های حفاری شده در محل کوبش نشان داد که نفوذ مصالح در این نقاط به ۴ متر رسیده‌است. در نتیجه تغییرات ایجاد شده در روش اجرا بر کارایی ستون‌های سنگی تاثیر مثبت داشت. در محدوده استحصالی بندر شهید بهشتی چابهار نیز پس از مشاهده نتایج نامطلوب در مرحله اول، روش بهسازی با اصلاحاتی به شرح زیر مجدداً اجرا گردید:

- در این پروژه نیز اجرای دو مرحله‌ای ستون‌ها با ایجاد فاصله زمانی در حدود ۲ تا ۴ روز در دستور کار قرار گرفت. به این ترتیب زمان بیشتری برای محو فشار آب حفره‌ای در خاک پیش از ادامه ضربات ایجاد می‌گردد.
- در اجرای اولیه مصالح دانه‌ای مورد استفاده از نوع شنی انتخاب شده بود. این مصالح پس از تعدادی ضربه متراکم شده و با ایجاد یک لایه متراکم جلوی نفوذ مصالح در خاک را می‌گیرد. با تغییر مصالح به مصالح سنگی^۱ امکان نفوذ بهتر و ایجاد ستون سنگی در خاک ایجاد می‌گردد.

پس از اعمال این تغییرات در روش اجرا، مجدداً گمانه‌ای در بین نقاط کوبش حفاری گردید. نتایج این گمانه در جدول ۲ نشان داده شده‌است. همان گونه که مشخص است پس از اعمال تغییرات مذکور، تراکم در لایه‌های تحتانی خاک که دارای ریزدانه بیشتری نیز بوده‌اند افزایش یافته‌است. با بررسی معیارهای روانگرایی مشخص شد با تغییرات ایجاد شده در عملیات اجرایی مشکل روانگرایی در محدوده مورد بهسازی حل شده‌است.

^۱ Oversize

جدول ۲- نتایج آزمایش نفوذ استاندارد پس از اجرای ستون شنی با اعمال تغییرات

عمق (متر)	عدد نفوذ استاندارد اولیه	عدد نفوذ استاندارد پس از اعمال اصلاحات
۱	۹	۴۰
۲	۱۱	۳۵
۳	۴۰	۳۹
۴	۲۶	۳۰
۵	۲۳	۲۵
۶	۵	۱۴
۷	۱۶	۱۸
۸	۱۰	۱۲
۹	۱۱	۱۳
۱۰	۶	۱۱

۵. نتیجه گیری

در این مقاله مطالعه موردی دو پروژه واقعی در خصوص اجرای ستون سنگی به روش جایگزینی دینامیکی در خاک دارای ریزدانه انجام شده است. نتایج حاصل به شرح زیر می باشد:

الف) در هر یک از پروژه ها اجرای عملیات جایگزینی دینامیکی در اولین مرحله به نتایج مطلوب نرسید. بنابراین اجرای آزمایشی بهسازی به روش ستون سنگی قبل از اجرای اصلی امری ضروری است.

ب) نتایج پروژه های مورد بررسی نشان می دهد که اقدامات زیر می تواند تاثیر مثبتی در راستای بهبود عملکرد ستون های سنگی به روش جایگزینی دینامیکی داشته باشد:

- اجرای کوبش بایستی در چند فاز و با ایجاد فاصله زمانی انجام گردد. با این روش زمان کافی برای محو فشار آب حفره ای در خاک ایجاد می شود.

- بهتر است از مصالح سنگی به عنوان مصالح دانه ای استفاده گردد زیرا مصالح شن و ماسه ای به دلیل ابعاد محدود نفوذ مناسبی در مصالح دانه ای ندارد و پس از تعدادی ضربه متراکم شده و از انتقال انرژی به لایه های پایین تر جلوگیری می نماید.

- یکی از عوامل کاهش کارایی ستون های شنی به روش جایگزینی دینامیکی انحراف وزنه در زمان برخورد است که باعث پخش شدن مصالح جایگزینی در اطراف محل کوبش می شود. حفظ راستای کوبش بر نتیجه اجرای تاثیر مهمی دارد.

۶. قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می دانند از سایر همکاران دفتر مرکزی و تیم نظارت شرکت مهندسین مشاور هندسه پارس در پروژه های آب شیرین کن ساقی کوثر و بندر شهید بهشتی چابهار که در حصول نتایج حاضر در این تحقیق نقش موثری داشتند تشکر و قدردانی نمایند.

۱۲. مراجع

1. FHWA-SA-95-037, "Dynamic Compaction", Geotechnical Engineering Circular No.1, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 1995.
2. FHWA-NHI-16-027, "Ground Modification Methods, reference Manual", Federal Highway Administration, US Department of Transportation, April 2017.

3. Zheng, Y.R., Chu, J., Lu, X. and Feng, Y.X. (2004), "*Improvement of Soft Ground by Dynamic Compaction*", Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society.
4. Thevanayagam, S., Martin, G.R., Nashed, R., Shenthan, T., Kanagalingam, T., Ecmis, N., "*Liquefaction remediation in Silty Soils Using Dynamic Compaction and Stone Columns*", Technical Report MCEER-06-0009, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 1995.
5. Lukas, R.G. (1997). "*Delayed soil improvement after dynamic compaction*", International conference on dredging. Dredging '94, ASCE.