

## بررسی روش‌های شناوری ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی همراه با ارائه مطالعه موردی

مهدی شیردل<sup>۱</sup>، حمیدرضا الهی<sup>۲</sup> و محسن صابر ماهانی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، باشگاه پژوهشگران جوان

<sup>۲</sup> دکترای مهندسی ژئوتکنیک، مدیر عامل شرکت خدمات بهسازی خاک سامان پی تهران

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

### چکیده

توسعه صنعتی و افزایش ساخت و سازهای بلند مرتبه، استفاده از روش‌های بهسازی خاک را جهت افزایش ظرفیت باربری خاک در برخی از مناطق دارای خاک نامناسب اجتناب‌ناپذیر می‌کند. در این راستا امروزه با گذشت زمان استفاده از دو روش شناوری ارتعاشی و روش جایگزینی ارتعاشی که به عنوان کارآمدترین روشهای بهسازی خاک مطرح می‌باشند، گسترش یافته است. لذا آشنایی مهندسان با روشهای مذکور از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق به بررسی اجمالی هر دو روش مذکور پرداخته شده و سپس نتایج عملیات بهسازی خاک انجام شده با ستون شنی واقع بر خاک رس سیلت‌دار دارای ماسه در یک پروژه در جنوب کشور (اهواز) گزارش شده است. شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه و خصوصیات سازه‌ای و ویژگی‌های دیگر پروژه به طور کامل مورد اشاره واقع شده است. در پروژه مورد بررسی قبل و بعد از عملیات بهسازی جهت تائید طرح بهسازی آزمایشهای SPT و PLT انجام شده است و نهایتاً نتایج حاصله، حاکی از مطلوب بودن طرح بهسازی (ستون شنی) ارائه شده برای ساختگاه مورد نظر بوده است. همچنین اجرای ستون شنی در ساختگاه مذکور منجر به افزایش حدود ۱/۵ تا ۲ برابری ظرفیت باربری شده است. به این ترتیب نشست زیاد و ظرفیت باربری کم خاک در ساختگاه اصلاح شده است.

**واژگان کلیدی:** بهسازی خاک، ارتعاش شناوری، ارتعاش جایگزینی، ستون شنی، مطالعه موردی.

### ۱- مقدمه

همراه با توسعه صنعتی بشر و انجام ساخت و ساز در مناطق واقع بر خاک‌های سست، بهسازی ساختگاه‌هایی با قابلیت باربری کم با گذشت زمان اهمیت بیشتری یافته است. در این جهت استفاده از دو رویکرد بهبود خواص باربری خاک با استفاده از روش‌های مختلف و استفاده از عناصر باربر جهت انتقال بار به اعماق روز به روز گسترش یافته است. با این حال بهبود مشخصات باربری خاک با روش‌های مختلف به لحاظ اقتصادی نسبت به استفاده از عناصر باربر جهت انتقال بار به اعماق برتر بوده و لذا مورد اقبال بیشتر مهندسان واقع شده است. روش‌های تراکمی در اعماق از جمله روش‌های بهسازی خاک بوده که به صورت ارائه شده در شکل (۱) طبقه‌بندی می‌شود.

امروزه با توجه به تعیین کننده بودن مسائل اقتصادی در انجام ساخت و سازهای معمول، استفاده از روش‌های شناوری ارتعاشی و ستون‌های شنی از ارجحیت بیشتری در بهسازی بستر سازه‌ها برخوردار هستند. لذا در این تحقیق روش‌های شناوری ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی مورد بررسی واقع شده و نهایتاً

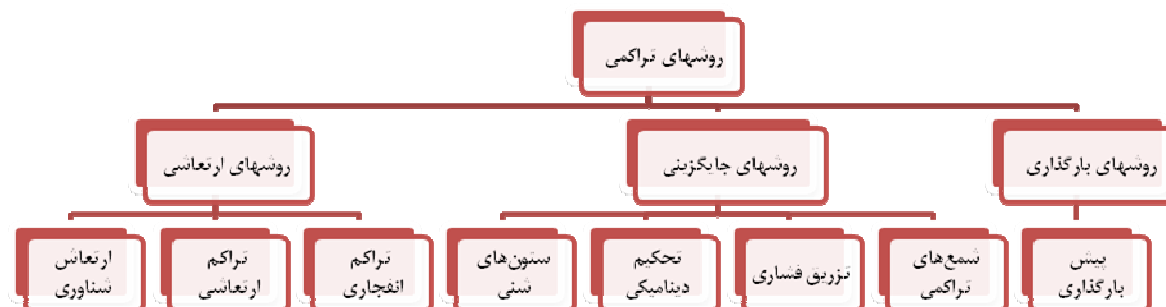
نتایج به دست آمده از یک مطالعه موردی انجام شده در اهواز ارائه شده است.

### ۲- روش ارتعاش شناوری

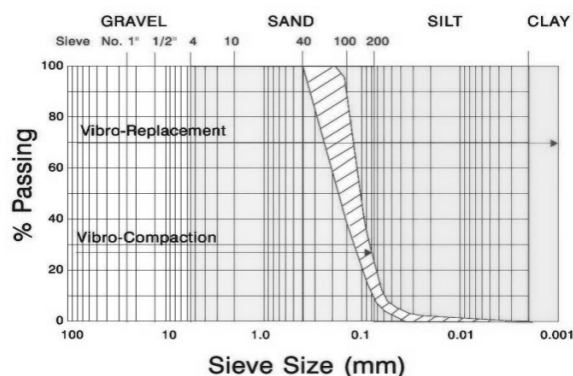
قدیمی‌ترین روش از میان روش‌های مرسوم تراکم در اعماق، روش شناوری ارتعاشی<sup>۱</sup> بوده که در سال ۱۹۳۰ در آلمان برای اولین بار مورد استفاده واقع شده است.

Johnson و همکاران [۱] از روش شناوری ارتعاشی در ترکیب با روش‌های دیگر تراکم در عمق جهت افزایش کارایی روش شناوری ارتعاشی استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه از ترکیب روش شناوری ارتعاشی همراه با روش کوبش سنگین جهت تراکم کردن خاکریزی به ارتفاع ۲۵ متر استفاده شده است به طوری که قسمت پایین خاکریز به وسیله روش شناوری ارتعاشی و قسمت بالایی آن با روش کوبش سنگین تراکم شده است.

Mitchell و Katti [۲] بیان می‌کنند که روش شناوری ارتعاشی بیشترین تأثیر را بر خاک‌های ماسه‌ای دارد به طوری که بیشترین درصد ریزدانه در خاک‌های ماسه‌ای به ۲۰٪ تا ۲۵٪ محدود گردد.



شکل ۱- نحوه طبقه‌بندی روش‌های مختلف تراکمی



شکل ۲- گستره کاربرد روش‌های شناوری ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی [۱۱]

Muir Wood و همکاران [۹] با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی وسیعی به مطالعه رفتار گروهی از ستون‌های شنی پرداختند و نتایج نشان دهنده این بود که مکانیسم گسیختگی و مدهای گسیختگی برای گروه ستون شنی نسبت به ستون شنی منفرد متفاوت می‌باشد.

Raju و همکاران [۱۰] برای از بین بردن نشست بیش از حد و حل مشکل روانگرایی ساختگاه یک مخزن گاز در منطقه هازیرای هندوستان بیش از ۴۵۰۰۰ متر ستون شنی با طول ۱۶ متر و قطر ۱ متر طرح داده شده بود، استفاده کردند. بعد از اجرای ستون‌های شنی به پایش نشست‌های اتفاق افتاده در این سازه پرداختند.

McKelvey و همکاران [۱۱] از ماده شفافی که مشخصات خاک رس را داشت، استفاده نمودند تا بتوانند رفتار ستون شنی را در حین بارگذاری به طور کامل ارزیابی نمایند. نسبت طول به قطر بهینه برای ستون‌های شنی، نتیجه نهایی بود که از این مطالعه آزمایشگاهی به دست آمد.

Vetriselvan و Deepak Raj [۱۲] برای بهسازی ساختگاه مخزنی عظیم در مانگالور هندوستان از این روش بهره جستند و

Andreu و همکاران [۳] و Boitano و Basore [۴] از روش شناوری ارتعاشی در ترکیب با پی‌های عمیقی همچون شمع استفاده کردند. دلیل اصلی این ترکیب روش‌ها تغییر در میزان تراکمی است که به وسیله روش شناوری ارتعاشی ایجاد می‌شود. Reed و Solymar [۵] از روش شناوری ارتعاشی جهت کاهش پتانسیل روانگرایی خاک در ترکیب با روش تراکم انفجاری استفاده کردند.

Wang و همکاران [۶] از این روش برای کاستن از پتانسیل روانگرایی خاک استفاده کردند.

### ۳- روش جایگزینی ارتعاشی

با توجه به مطالعات انجام شده و نتایج بدست آمده، محققان به این نتیجه رسیدند که از تلفیق روش‌های جایگزینی و روش‌های شناوری ارتعاشی، روش‌هایی با کارایی مطلوب‌تر و بازدهی بیشتر حاصل می‌گردد. بدین ترتیب روشی نوین را پایه‌گذاری نمودند که به روش جایگزینی ارتعاشی (ستون شنی) معروف شد. این روش که ماهیت فیزیکی و مکانیکی دارد، برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ در ایرلند مورد استفاده واقع شد. ولی با گذشت زمان به حدی در عرصه مهندسی ژئوتکنیک کارا بود که مؤسسه آزادراه‌های آمریکا (FHWA) آیین‌نامه‌ای تحت عنوان طراحی و ساخت ستون‌های سنگی در سال ۱۹۸۳ منتشر کرد. با توجه به مزایای زیاد مورد بحث، محققان به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد ستون شنی پرداختند تا بتوانند فرآیند طراحی ستون‌های شنی را هر چه بیشتر ارتقا دهند [۷].

Navfac [۸] برای خاک‌های رسی، سیلتی و خاک‌های سیمانته شده، استفاده از روش شناوری ارتعاشی را پیشنهاد نمی‌کند ولی برای خاک‌هایی همچون شن و ماسه استفاده از روش شناوری ارتعاشی را مطلوب می‌داند. بازه مناسب استفاده هر یک از روش‌های اشاره شده به وضوح در شکل (۲) نشان داده شده است.

۴- مطالعه موردی (ساختمان ۲ بلوک ساختمانی ۸ طبقه)  
جهت بررسی عملکرد ستون شنی و چگونگی تأثیرگذاری این سازه خاکی بر پارامترهای نشست و ظرفیت باربری، یک مطالعه موردی که شامل بهسازی بستر ۲ بلوک ساختمانی ۸ طبقه در زمینی به مساحت ۱۰۰۰ متر مربع در شهر اهواز می‌باشد، انجام شده است [۱۵].  
در ساختمان پروژه، ۶ گمانه با عمق ۴۰ متر جهت شناسایی لایه‌های زیر سطحی حفاری شده و لایه‌های زیرسطحی خاک که شامل رسوب‌گذاری رس، سیلت و ماسه بوده، شناسایی شده است. موقعیت گمانه‌های حفر شده در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین سطح آب زیرزمینی در گمانه‌های حفر شده در عمق ۲ متری قرار داشته و به این ترتیب با توجه به جنس خاک و عمق آب، احتمال وقوع روانگرایی وجود داشته است. مشخصات لایه‌های زیرسطحی شناسایی شده در جدول (۱) آورده شده است.

نهایتاً پس از پر شدن مخزن، نشست‌های بالقوه، سازه عظیم ساخته شده را تحت تأثیر خود قرار نداد. قابل ذکر است که خاک این منطقه حاوی رس نرم و ماسه سیلتی بوده است.

Rajani و Raj [۱۳] از روش ستون شنی برای بهسازی خاک‌های نرم ساختمان یک سازه بسیار بزرگ مخزنی در بندر مامبای هندوستان استفاده کردند. نتایج گزارش شده توسط ایشان نیز نشان دهنده عملکرد بسیار مطلوب ستون‌های شنی بود.

Deepak Raj و Dikshith [۱۴] از روش ستون شنی برای بهسازی جاده‌ای به طول تقریبی ۲۵۰۰ متر و عرض ۱۴ متر استفاده نمودند. هدف از این عملیات بهسازی خاک که در کنار ساحل انجام گرفته بود، حمل یک کشتی ۴۰۰ تنی به سمت دریا ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات خاک لایه‌های زیرسطحی ساختمان پروژه [۱۵]

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	PL (%)	LL (%)	Fine (%)	Sand	USCS	N <sub>SPT</sub>	ضخامت (متر)	لایه
۲۰	۲۰	۲۷	۶۶	۳۴	CL- ML SP- SM	۱۲	۸ الی ۱۲	L1-1
۲۰	۲۱	۳۱	۴۳	۵۷		۲۱	۷	L1-2
۲۰	۱۶	۳۵	۵۷	۴۳		۵۴	۵ الی ۸	L1-3
۲۰	۲۱	۳۴	۸۵	۱۵	CL-ML-CH	۳۶	۱۰ الی ۱۴	L2
۲۱	-	-	۵۰	۵۰	SP- SM-ML	> ۵۰	> ۸	L3



شکل ۳- پلان موقعیت گمانه‌های مطالعات ژئوتکنیک حفر شده در ساختمان

جدول ۳- فواصل ستون‌های شنی در پلان با توجه به معیارهای لازم

معیار نشست (متر)	معیار گسیختگی (متر)	قطر ستون شنی (متر)
۲/۶	۲/۱	۰/۸
۲/۱	۱/۷	۱

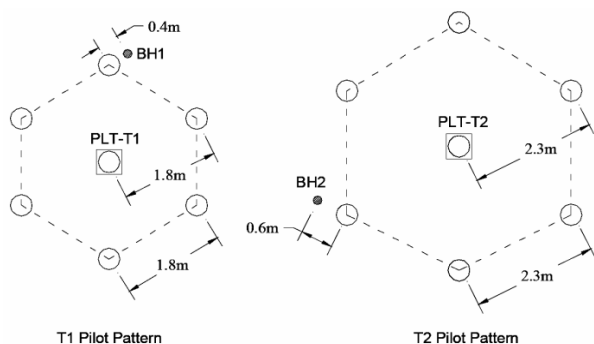
#### ۴-۲- کنترل طرح

دو نوع چیدمان مثلثی شکل با فواصل ۲/۳ متر و ۱/۸ متر با هدف نهایی‌سازی طرح اصلی، مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفت. نحوه چیدمان اولیه و مکان انجام آزمایش‌های کنترلی در شکل (۴) نشان داده شده است.

آزمایش‌های کنترلی جهت اطمینان از درستی طرح مورد نظر قبل از پیاده‌سازی طرح در ساختگاه مورد نظر انجام شد. آزمایش‌های کنترلی شامل:

- آزمایش بارگذاری صفحه (PLT-NG) در خاک بهسازی نشده منطقه
- دو آزمایش بارگذاری صفحه (PLT-T1 و PLT-T2) جهت نهایی شدن طرح ارائه شده در ساختگاه مورد نظر
- انجام آزمایش‌های (SPT) در هر ۱ متر و تا عمق ۱۰ متری قبل و بعد عملیات بهسازی
- انجام سه آزمایش بارگذاری صفحه PLT-D4، PLT-F6 و PLT-M27 بعد از انجام عملیات ساخت ستون‌های شنی اصلی پروژه

بعد از طرح اولیه و قبل ساخت نهایی ستون‌های شنی، تعدادی ستون شنی آزمایشی در ساختگاه مورد نظر ساخته شد. جهت کنترل اولیه تطابق عملکرد خاک بهسازی شده با معیارهای مربوطه، از آزمایش‌های بارگذاری صفحه و SPT استفاده شد و نهایتاً با استفاده از آنالیزهای برگشتی مبتنی بر تئوری الاستیسیته نتایج ارائه شده در جدول (۴) بدست آمد.



T1 Pilot Pattern

T2 Pilot Pattern

شکل ۴- چیدمان آزمایش‌های کنترلی مابین ستون‌های شنی اولیه

بر حسب مطالعات صورت گرفته و نتایج بدست آمده از عملیات کاوش‌های صحرایی، ظرفیت باربری خاک برای ساخت سازه با بیش از ۵ طبقه کافی نبوده و بنابر این انجام عملیات بهسازی خاک در ساختگاه مورد نظر اجتناب‌ناپذیر بوده است. از این رو براساس مطالعات فنی و اقتصادی انجام شده بر روی روشهای مختلف افزایش باربری همچون میکروپایل، شمع‌های بتنی برج، شمع‌های فولادی و ستون شنی، گزینه ستون شنی به عنوان گزینه برتر انتخاب شد.

#### ۴-۱- طرح ستون شنی

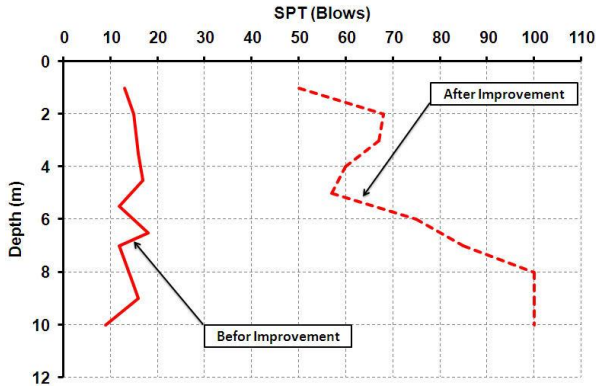
مهم‌ترین معیار در طراحی حاضر، رسیدن به نشست مجاز و ظرفیت باربری با ضریب اطمینان ۱/۵ می‌باشد. بر اساس شرایط لایه‌های زیرسطحی و محدودیت‌های روش ساخت، بیشترین عمق بهسازی به ۱۰ متری زیر پی محدود شد. طرح مثلثی جهت چیدمان ستون شنی انتخاب و برای پی با ضخامت حدود ۱ متر، بالشتک شنی با ضخامت ۰/۵ متر جهت پخش مناسب تنش در زیر پی در نظر گرفته شد. مشخصات مصالح شنی مورد استفاده در ساخت ستون شنی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح شنی استفاده شده در ساخت ستون شنی

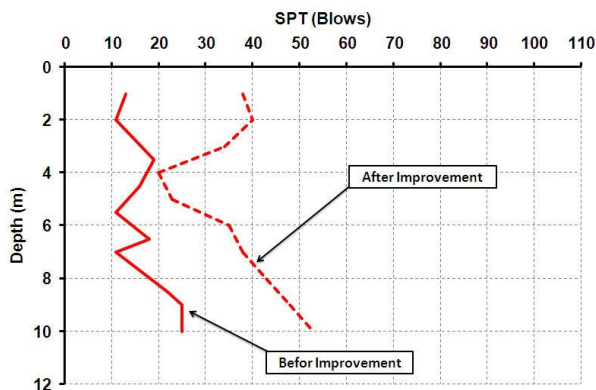
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (degree)	C (kPa)	E (MPa)	$\nu$
۱۹	۲۱	۴۰	۰	۷۵	۰/۳

تعیین ظرفیت باربری و محاسبات نشست ستون شنی با نرم افزار Stone-C (ver 3) که توسط Pribe در سال ۱۹۹۵ توسعه یافته، انجام شده است [۱۶]. این نرم‌افزار که بر پایه تئوری الاستیسیته بوده، توسط گروه نرم‌افزاری Geologismiki ایجاد شده و نهایتاً شرکت Vibroflotation Group در جهت ارتقای این نرم‌افزار با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از آزمایش‌های برجا اقدام نموده است [۱۷ و ۱۸].

بر اساس مطالعات طراحی، ستون شنی با طول ۱۰ متر و قطر ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر جهت رسیدن به معیارهای مورد نظر انتخاب شد. همچنین، میانگین توزیع یکنواخت بارهای قائم در زیر پی حدود ۱۵۰ کیلو پاسکال بوده و بدین ترتیب بیشترین فضای مجاز بین ستون‌های شنی طبق جدول (۳) بدست آمد.



(الف)



(ب)

شکل ۴- نتایج بدست آمده از آزمایش‌های SPT برای ستون‌های

شنی کنترلی: الف) فاصله گمانه ۰/۴ متر از مرکز،

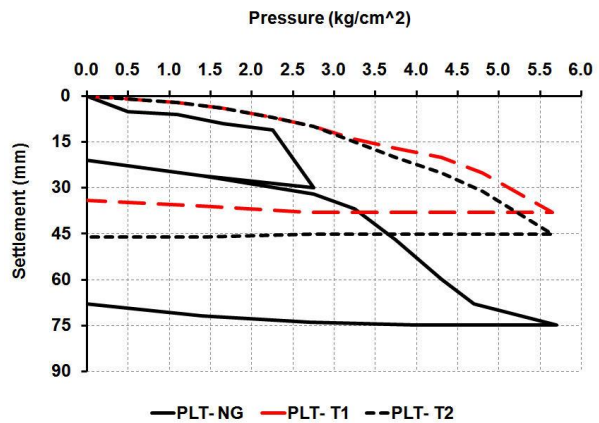
ب) فاصله گمانه ۰/۶ متر از مرکز

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش SPT، دانسیته نسبی خاک بعد از بهسازی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است به طوری که در گمانه شماره ۱ با فاصله ۰/۴ متری میزان افزایش عدد SPT حدوداً دو برابر گمانه شماره ۲ با فاصله ۰/۶ متری می‌باشد. همچنین مقدار عدد SPT بعد از بهسازی در گمانه شماره ۱ حدود ۶ برابر و در گمانه شماره ۲ حدود سه برابر نسبت به حالت قبل از بهسازی بوده است. البته این بیان در عمق ۲ تا ۶ متری درست نیست؛ چرا که روند افزایشی دانسیته خاک در عمق مورد نظر متوقف و رو به کاهش گذارده است. به عبارت دیگر میزان تأثیرگذاری ارتعاش در عمق مورد اشاره کم بوده است. در حالی که از عمق ۶ تا ۱۰ متری گمانه، روند افزایشی دانسیته نسبی ادامه داشته است. سرانجام طرح ستون شنی با استفاده از دستگاهی با طول ارتعاشگر ۳ متر، قطر ۰/۴ متر، وزن ۱۵ تن و قدرت ۷۵ کیلو وات به اجرا در آمد. در نهایت پس از نهایی شدن طرح مورد نظر و ساخت ستون‌های شنی در ساختگاه مورد نظر، آزمایش

جدول ۴- نتایج بدست آمده از آزمایش‌های اولیه و آنالیزهای برگشتی

آزمایش	نشست صفحه (cm)	مدول الاستیسیته (MPa)	نشست فونداسیون (cm)
PLT-NG	۷	۱۲	۱۴
PLT-T1	۳	۲۷	۷
PLT-T2	۳/۵	۲۶	۸

آزمایش بارگذاری صفحه در این مرحله به عنوان ملاک ارزیابی در نظر گرفته شد و به این ترتیب نتایج ارائه شده در شکل (۵) به دست آمد. با دقت در نتایج بدست آمده می‌توان مشاهده نمود که نشست در هر دو آزمایش (PLT-T1 و PLT-T2) تقریباً مساوی بوده که در نتیجه فاصله بینابین ۲ متر جهت طرح نهایی مناسب تشخیص داده شد. همچنین با توجه به این که نسبت نشست بعد به قبل بهسازی در حدود ۰/۴ تا ۰/۵ بوده لذا کاهش تقریبی ۵۰ درصدی نشست بعد از بهسازی امری محتمل خواهد بود. در جهت تعیین میزان نفوذ دانه‌های شن در اطراف ستون شنی، تعیین قطر تقریبی آن و تعیین میزان تراکم رخ داده در اطراف ستون شنی از نمونه‌برداری به وسیله حفر ۲ گمانه ماشینی و انجام همزمان آزمایش SPT استفاده شده است. در شکل (۶) نتایج بدست آمده از آزمایش SPT قبل و بعد ساخت ستون شنی کنترلی نشان داده شده است.



شکل ۵- نتایج بدست آمده از آزمایش‌های PLT کنترلی اولیه

تعیین میزان تراکم نمونه‌های بدست آمده در فواصل ۰/۴ و ۰/۶ متری از مرکز ستون شنی نشان دهنده نفوذ دانه‌های شن تا فاصله ۰/۵ تا ۰/۶ متری بوده است که به این ترتیب قطر تقریبی ۱ تا ۱/۲ متری برای طرح نهایی، مناسب تشخیص داده شد.

ساختمان نشان از افزایش دانسیته نسبی تا حدود ۳ برابر حالت اولیه داشته است که به این ترتیب با استفاده از این روش بهسازی، محدودیت ظرفیت باربری به طور اقتصادی در اکثر پروژه‌ها رفع خواهد شد.

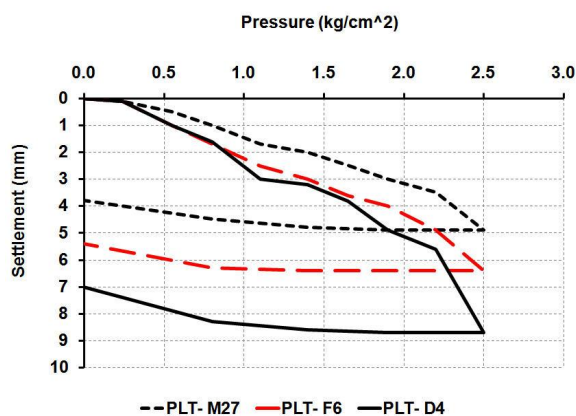
همچنین عملکرد مطلوب و هماهنگ ستون‌های شنی در بالا بردن ظرفیت باربری خاک ساختمان با استفاده از آزمایش‌های کنترلی به اثبات رسید.

#### ۶- مراجع

- [1] Johnson, D., Nicholls, R., Thomson, G. H., "An Evaluation of Ground Improvement at Belawan Port", North Sumatra, Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 1983, 1, pp 45-52.
- [2] Mitchell, J. K., Katti, R. K., "Soil Improvement State of the Art Report", 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981, pp 261-313.
- [3] Andreu, J., Arcones, A., Soriano, A., "Ground Improvement and Pile Driving at Los Barrios (Spain)", Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 1983, 1, pp 193-198.
- [4] Basore, C. E., Boitano, J. P., "Sand Densification by Piles and Vibroflotation", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, pp 95 (SM-6), 1303-1323.
- [5] Solymar, Z. V., Reed, D.J., "A Comparison of Foundation Compaction Technique", Canadian Geotechnical Journal, 1986, Vol. 23 (3), 271-280.
- [6] Wang, Y., Zhang, W., Qiao, T., "Evaluation of the Effect of Saturated Silty and Fine Sand Foundation Improved by Vibroflotation in Seismic Area", Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, 1988, 2, pp 963-968.
- [7] FHWA, "Design and Construction of Stone Columns", Report No. FHWA/RD-83/026, 1983.
- [8] NAVFAC., "Soil Dynamics and Special Design Aspects", Facilities Engineering Command, DM-7.3, Naval Washington, D.C, 1997.
- [9] Muir Wood, D., Hu, W., Nash, D. F. T. "Group Effects in Stone Column Foundations

بارگذاری صفحه PLT-D4، PLT-F6 و PLT-M27) به عنوان آزمایش کنترلی نهایی به صورت تصادفی در سه نقطه از ساختمان انجام شد. انجام این سه آزمون برای اطمینان از عملکرد مناسب ستون‌های شنی و اطمینان از درستی طرح ارائه شده لازم است. نتایج به دست آمده از این سه آزمون در شکل (۷) ارائه شده است.

به طور کلی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های کنترلی صورت گرفته در نقاط مختلف تصادفی، شباهت عملکردی ستون‌های شنی و نبود اختلاف زیاد در مقادیر بدست آمده را بیان می‌دارد. همچنین سختی به دست آمده (شیب نمودارها) در آزمایش‌ها نشان از عملکرد نسبتاً هماهنگ ستون‌های شنی در برابر بارهای وارده دارد.



شکل ۷- نتایج سه آزمون بارگذاری صفحه انجام شده در انتهای پروژه

#### ۵- نتیجه‌گیری

عملیات بهسازی برای سازه‌های مختلف در زمین‌هایی با ظرفیت باربری کم از ضروریات ساخت می‌باشد. از این رو به طور کلی آشنایی مهندسان با روش‌های نوین بهسازی منجر به استفاده از سازه‌های خاکی با عملکرد مطلوب‌تر و صرفه اقتصادی بالاتر می‌شود و زمینه را برای بهینه‌سازی فنی و اقتصادی در پروژه‌های مختلف فراهم می‌کند. لذا در این تحقیق به بررسی جزئیات و ویژگی‌های دو روش شناوری ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی پرداخته شده است.

مطالعه موردی انجام شده در اهواز جهت ارزیابی عملکرد ستون شنی، کارآمد بودن این روش را در بهسازی خاک ساختمان با عملکرد مطلوب فنی و صرفه بالای اقتصادی را به اثبات رساند. به طوری که آزمایش‌های کنترلی انجام شده بعد از بهسازی

- India, Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, 2008, Bangalore, India.
- [14] Deepak Raj, Dikshith, C. V., "Vibro Replacement Columns for Shipyard Infrastructure at Pipavav, Gujarat, India", Ground Improvement Technologies and Case Histories, Published by Research Publishing Services, 2009.
- [15] DaryaKhakPey Consultant Engineers., "Geotechnical Site Investigation Khouzestan Office Building of Electricity", Report No. 85-12, 2005.
- [16] Priebe H. J., Grundbau K., "The Design of Vibro Replacement", Ground Engineering Dec, 1995.
- [17] [www.geologismiki.gr](http://www.geologismiki.gr)
- [18] [www.vibroflotation.com](http://www.vibroflotation.com)
- Model Tests", Geotechnique, 2000, 50 (6), 689-698.
- [10] Raju, V. R., Wegner, R., Vetriselvan, A., "Application of Vibro Techniques for Infrastructure Projects in India", Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, Roorkee, India, 2003.
- [11] McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. Graham, J. "Modelling vibrated stone Columns in Soft Clay", Proceedings of the Institute of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2004, Vol. 157, Issue GE3, pp 137-149.
- [12] Vetri Selvan, A., Raj, D., "Vibro Replacement as Foundation for Tank Farms in India", Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, 2006, Chennai, India.
- [13] Raj, D., Rajani, K. D., "Ground Improvement Works Using Vibro Replacement for Container Freight Station at Navi Mumbai",