اهمیت در نظر گرفتن دانه‌بندی در انتخاب نوع مصالح پرکننده در ستون‌های ماسه‌ای و شنی و خرده‌سنگی

محمدمهدی پاردسوئی [1*]

۱- دانشجوی دکتری، شرکت مهندسین مشاور هندسه پارس، تهران، ایران

چکیده

بهسازی زمین به‌عنوان یک نیاز مهم در صنعت ساخت‌وساز امروز یک روش معمول بهسازی زمین است. تکنیک کاربرد ستون‌های خرده‌سنگی و ماسه‌ای روشی بسیار کارآمد برای بهبود پارامترهای مقاومتی خاک مانند ظرفیت باربری و همچنین کاهش نشست تحکیمی است. کارایی این تکنیک در درجه اول به نوع مواد پرکننده و همچنین تراکم نسبی آن‌ها بستگی دارد. این تکنیک یک روش جایگزین بسیار مقرون‌به‌صرفه برای پروژه‌هایی می باشد که نیازمند اجرای شمع و فونداسیون عمیق هستند. در کشور ما همچنان در خصوص دانه‌بندی، خصوصیات مهندسی و میزان تراکم بسته به شرایط پروژه موردنظر بهسازی، یک‌رویه واحد و مدون وجود نداشته و عمدتاً بسته به مصالح در دسترس، نوع مصالح مورداستفاده در ستون‌های خرده‌سنگی تعیین می‌گردند. بسته به نوع عملکرد غالب مورد انتظار که می‌تواند زهکشی و کنترل روان‌گرایی یا کنترل نشست ویا هر دو این موارد باشد، نوع و دانه‌بندی مصالح تشکیل‌دهنده ستون‌های ماسه‌ای می تواند تأثیر قابل‌توجهی در عملکرد آن‌ها داشته باشد. در صورت وجود لایه‌های بسیار ضعیف در یک پروژه، پیشنهاد می‌گردد که از محدوده‌های دانه‌بندی درشت‌دانه‌تر استفاده گردد. در خصوص ستون‌های ماسه‌ای میزان رد شده از الک ۲۰۰ می‌بایست به ۱۵ درصد و در خصوص ستون‌های خرده‌سنگی و شنی به ۵ درصد محدود گردد. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در انتخاب نوع مصالح پرکننده و همچنین نحوه اجرای ستون‌ها در پروژه، میزان مقاومت برشی زهکشی نشده خاک و درجه حساسیت آن است که می‌بایست در بررسی‌های تحت‌الارضی اولیه به‌دقت توسط متخصصین ذی‌صلاح موردتوجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ستون شنی، ستون ماسه‌ای، بهسازی، دانه‌بندی، مصالح جایگزینی

۱- مقدمه

ایران خط ساحلی بزرگی بیش از 1400 کیلومتر دارد . با توجه به تحولات مناطق ساحلی در سال‌های گذشته، تعدادزیادی بنادر و صنایع در حال ساخت در مناطق ساحلی هستند . علاوه بر این، در دسترس بودن زمین برای توسعه تجاری، مسکن، صنعتی و حمل و نقل، زیرساخت‌ها و غیره به ویژه در مناطق شهری محدود است .این امر ناگزیر استفاده از زمین‌هایی را که دارای قشرهای ضعیف می‌باشند و در گذشته برای هر گونه ساخت و ساز نامطلوب در نظر گرفته می شدند را ضروری می نماید که این امر باعث به وجود آمدن چالش های زیادی برای مهندسان ژئوتکنیک گردیده است . بسیاری از این مناطق دارای رسوبات ضخیم نرم دریایی با مقاومت برشی بسیار کم و تراکم پذیری بالا هستند. از میان چندین روش موجود برای بهسازی لایه‌های ضعیف، ستون‌های شنی ، خرده‌سنگی و ماسه‌ای تا حد زیادی برای بهسازی پروژه‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند. ستون‌های خرده‌سنگی یا ماسه‌ای در سطح بین المللی به‌عنوان یک تکنیک موفق،

پایدار و کارآمد برای بهبود ظرفیت باربری و کنترل نشست خاک‌های نرم به کار گرفته شده اند و در بسیاری از موارد به‌عنوان یک جایگزین اقتصادی برای پی‌های عمیق در نظر گرفته می‌شوند. استفاده از ستون‌های ماسه‌ای و خرده‌سنگی به طور گسترده ای برای بهبود ظرفیت حمل بار و کاهش نشست خاک‌های نرم استفاده می‌شود. این تکنیک شامل حفاری سوراخ‌هایی با ابعاد و ترتیب خاص در خاک نرم و پر کردن آنها با قطعات خرده سنگ یا ماسه و یا ترکیبی از این دو مصالح با دانه بندی مشخص است. طراحی ستون سنگی بر اساس تجربیات گذشته و همچنان تجربی است و اظهار نظر قطعی در خصوص عملکرد نهایی آن‌ها نیاز به آزمایشات میدانی قبل از اجرا دارد[4] . امروزه ستون‌های سنگی به دلیل صرفه قابل توجه در هزینه انجام پروژه وکاهش زمانی دوره اجرا که می توانند نسبت به راه حل‌هایی نظیر استفاده از شمع‌ها یا تراکم دینامیکی یا جایگزینی معمول ارائه دهند محبوبیت خود را به دست آورده اند. انتخاب نوع و خصوصیات مواد پرکننده نقش عمده‌ای در فرایند طراحی ستون‌های ماسه‌ای یا خرده‌سنگی را بازی می‌کند، زیرا مستقیماً با هزینه و مزایای قابل‌دستیابی مفروضه مرتبط است . سنگ‌های خرد شده در سنگ‌شکن‌ها و همچنین مخلوط‌های کوهی و رودخانه‌ای به طور گسترده‌ای در بسیاری از پروژه‌ها مورداستفاده قرار گرفته است و ثابت شده است که در هنگام استفاده در بهسازی رسوبات نرم، در ایجاد پیشرفت‌های موردنظر کارآمد است. تا به امروز هیچ‌گونه ضوابط و محدوده مشخصی و مدونی در خصوص مشخصات مهندسی مصالح پرکننده از نظر اندازه ذرات، نوع دانه‌بندی و میزان تراکم نهایی بعد از قرارگیری در ستون‌های خرده‌سنگی و ماسه‌ای باتوجه‌به نوع عملکرد آن‌ها در مفروضات طراحی وجود ندارد و عمده تصمیم‌گیری‌ها دراین‌خصوص باتوجه‌به قضاوت مهندسی انجام می‌گردد. ازنقطه‌نظر عملی، اندازه بهینه ذرات باید طوری انتخاب شود تا پرشدن ستون با درجه تراکم موردنظر حاصل گردد. پس از بررسی‌های انجام شده توسط [۳-۱] مشخص شده است که طیف وسیعی از نسبت متوسط قطر ذرات سنگ به قطر ستون شامل ۱/۱۰، ۱/۱۲ ، ۱/۱۳، ۱/۲۰ ، ۱/۳۰ و ۱/۶۴ در پروژه های مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند.

در مواردی که مصالح سنگی خرد شده مناسب وجود نداشته باشد و یا محل معادن قرضه مصالح مناسب دور از محل موردنیاز در پروژه باشند، معمولاً ماسه منبع جایگزین مناسبی می‌تواند باشد. این موضوع در حال حاضر در بخش‌های کویری و بیابانی و یا مناطقی که ملاحظات شدید زیست‌محیطی وجود دارد صادق است. یکی از معایب ماسه پایین‌بودن زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با ستون‌های خرده‌سنگی است [۴]. دراین‌خصوص در بخش‌های بعدی توضیحات مفصلی داده خواهد شد.

۲- عملکرد ستون‌ها و زهکش‌های ماسه‌ای و خرده‌سنگی

لایه‌های خاک‌های زیرسطحی که مقاومت برشی زهکشی نشده آنها بین 7 تا 50 کیلو پاسکال است یا خاکهای شنی سست سیلتی یا ماسه‌های رسی نشان دهنده یک لایه بالقوه از توده خاک‌هایی هستند که نیاز به بهسازی توسط ستون‌های خرده‌سنگی یا ماسه‌ای دارند . شرایط زیرسطحی که ستون‌های خرده‌سنگی یا ماسه‌ای به‌طورکلی برای آن مناسب نیستند شامل خاک رس و سیلت حساس (درجه حساسیت بزرگ‌تر از ۴) است که در هنگام اعمال ارتعاش دینامیکی استحکام خود را از دست می‌دهند و همچنین در مواردی که لایه‌هایی با باربری مناسب برای قرارگیری انتهای ستون در زیر لایه‌های ضعیف موردنظر موجود نیست. عمق بهسازی با ستون‌های خرده‌سنگی یا ماسه‌ای برای پروفیل خاک معین باید به‌گونه‌ای تعیین شود که تنش‌های سربار اعمالی بر این ستون‌ها ازطریق لایه‌های سخت زیرین منتقل شود. میانگین بیشترین عمق ستون سنگی انجام شده در ایران در حدود ۱۵ متر است، اگرچه با اصلاح تجهیزات، اعماق بالاتر از 20 متر نیز قابل حصول است. ستون‌های خرده‌سنگی یا ماسه‌ای زمانی مؤثرتر عمل می‌کنند که برای تثبیت سطح وسیع توده خاک استفاده شوند . کاربرد آنها در گروه‌های کوچک زیر پی ساختمان‌های شهری محدود بوده و معمولاً مورداستفاده قرار نمی‌گیرد . مناطق بارگذاری شده بزرگ که شامل بارگذاری یکنواخت مانند زیر خاکریزها، مخازن و سازه‌های صنعتی و غیرصنعتی بزرگ حوزه اصلی کاربرد این روش بهسازی خاک است.

تثبیت خاک‌ها با تراکم به کمک ویبراتور، پر کردن مجدد فضای حاصل با مواد دانه‌ای مناسب و تکرار چندباره عملیات متراکم‌سازی آن‌ها با ویبراتور، اصطلاحاً ستون‌های ویبره‌ای یا به عامیانه ستون‌های شنی نامیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، ستون‌های شنی در جایی ساخته می‌شوند که در خاک نرم با جایگزینی درصد معینی از خاک با سنگ‌دانه، تقویت می‌شود. اصطلاح عامیانه ستون شنی به نظر نگارنده عبارت مناسبی نمی‌باشد و بسته به نوع مصالح پرکننده بهتر است که در صورت استفاده از مصالح سنگی از عبارت ستون‌های خرده‌سنگی و در صورت استفاده از ماسه از عبارت ستون‌های ماسه‌ای و در صورت استفاده از شن عبارت ستون شنی استفاده شود تا به توجه به این نام‌گذاری که بر اساس نوع مصالح پرکننده است، عملکرد ستون‌های اجرا شده توسط دیگر عوامل ذی‌ربط در پروژه مشخص گردد.

در خاک های سست رسی که احتمال نشست های تحکیمی بعد از ساخت وجود دارد ستون شنی به‌عنوان یک کانال زهکشی عمل می کند تا آب منفذی اضافی موجود در زیر خاک را آزاد کند . با جایگزینی بخشی از خاک های نرم با مصالح منتخب پر کننده دانه ای فشرده، یک مصالح اختلاطی تشکیل می شود که متراکم تر از خاک درجای اصلاح نشده است. در این حالت ستون های خرده‌سنگی و ماسه‌ای به‌عنوان زهکش عمل می کنند و زمان وقوع تحکیم اولیه را به میزان قابل توجهی کاهش می دهند. به دلیل استحکام سریع نشست، نشست ناشی از خزش نیز در هنگام استفاده از ستون های خرده‌سنگی کاهش می یابد. دلیل بهبود خاک های نرم توسط ستون ها و زهکش های ماسه‌ای و خرده‌سنگی به دلیل متراکم شدن خاک نرم اطراف در حین نصب خود ستون سنگی و متعاقب آن تسریع فرآیند تحکیم در خاک نرم قبل از بارگذاری نهایی خاک اصلاح شده است [۵-۷] . در خصوص خاک های دانه ای نیز وجود ستون های شنی از پدیده روانگرایی ناشی از زلزله جلوگیری می نماید. ستون ها و زهکش های ماسه‌ای و خرده‌سنگی باعث کاهش فشار منفذی در لایه های دانه ای در هنگام زلزله می شوند و از این رو پتانسیل روانگرایی را کاهش می دهند. [۸-۱۰].

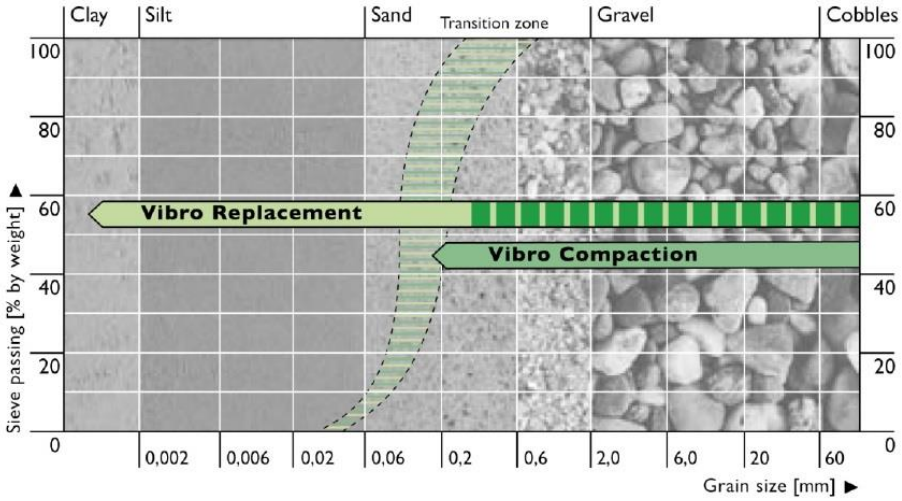
۳- نحوه اجرای ستون‌های خرده‌سنگی و ماسه‌ای در ایران

باتوجه‌به عدم ورود تکنولوژی‌های جدید در کشور ما، نحوه اجرای ستون‌های خرده‌سنگی و ماسه‌ای در ایران همان روش‌های مورداستفاده در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی است. عمده ستونهای خرده‌سنگی درایران به روش جایگزینی اجرا می‌گردند. فرآیند اجرایی را که در آن خاک قرار گرفته در محل ستون توسط دستگاه حفاری خارج می‌شود را اصطلاحاً جایگزینی می‌نامند. در این تکنیک، از یک لوله جداری پوششی که توسط کوبه یا به وسیله ارتعاش دستگاه ویبراتور به درون خاک رانده می‌شود جهت پایدار سازی جداره خاکریز، استفاده می‌شود. سپس توسط مته حفاری مخصوص، خاک داخل لوله پوششی[1] تخلیه می‌گردد و مصالح موردنظر به وسیله لودر یا بیل به درون جداره حفاری شده ریخته می‌شود. با بیرون کشیدن لوله متصل به دستگاه ویبراتور در یک بازه زمانی (که بوسیله سعی و خطا به دست می‌آید) قطر بزرگتری در این ستون‌ها (نسبت به قطر غلاف فلزی) حاصل می‌شود و در این حالت قسمتی از مصالح جایگزینی نیز به درون خاک اطراف نفوذ می‌نماید. این ستون‌ها با مهار جانبی ارائه شده توسط خاک اطراف استحکام خود را به دست می‌آورند، بنابراین بسیار ضروری است که مقاومت برشی خاک اطراف با ساخت ستون سنگی کاهش نیابد . از این رو، تکنیک ستون سنگی با روش جایگزینی را تنها می‌توان در خاک رس‌هایی با حساسیت کم به کار برد . این ستون‌ها همچنین به‌عنوان مسیرهای زهکشی برای تسریع نشست‌های تحت بارگذاری عمل می‌کنند. روش یاد شده بیشتر در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی درکشورهایی مثل هند و تایلند مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱] که البته با ورود تجهیزات و تکنولوژی های نوین منسوخ گردیده است. البته به صورت محدود تجهیزات vibrofloat (شناور سازی ارتعاشی) با تغذیه مصالح تر و خشک نیز وارد شده اند که در این روش مصالح منتخب با استفاده از فشار سیال با مصالح موجود اختلاط گردیده و ساختار بدنه ستون سنگی را به وجود می آورند.

1- casing

۴- ارتباط مصالح پر کننده و خاک در محل در بهسازی خاک

بر اساس نشریه ۵۲۵ با عنوان " راهنمای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک، پیامدها و روش‌های کاهش مخاطرات آن " [۱۲] مناسب بودن یک خاک برای انجام روش‌های تراکم ارتعاشی بیشتر به دانه بندی آن بستگی دارد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است خاک‌هایی که منحنی دانه بندی آنها کاملاً در سمت درشت دانهٔ ناحیهٔ هاشور خورده قرار می‌گیرد، با استفاده از وسایل ارتعاشی عمقی به آسانی متراکم می‌شوند. چنانچه منحنی دانه بندی روی ناحیه هاشور خورده بیفتد، به منظور افزایش برخورد میان وسیله ارتعاشی و خاک در حال اصلاح، توصیه می‌شود برای پرکردن حفرات ایجاد شده در طی عملیات تراکم به جای ماسه از مصالح خرده سنگی استفاده شود. خاک‌هایی که بخشی از منحنی دانه بندی آنها یا تمام آن در سمت ریزدانهٔ هاشور خورده قرار بگیرد، با روش تراکم ارتعاشی به راحتی متراکم نمی‌شوند. هرچند می‌توان این خاک‌ها را به کمک روش جایگزینی دینامیکی بهسازی کرد.



شکل ۱: محدوده انواع خاکهای مناسب برای بهسازی با استفاده از روش‌های تراکم ارتعاشی و جابجایی ارتعاشی [۱۲]

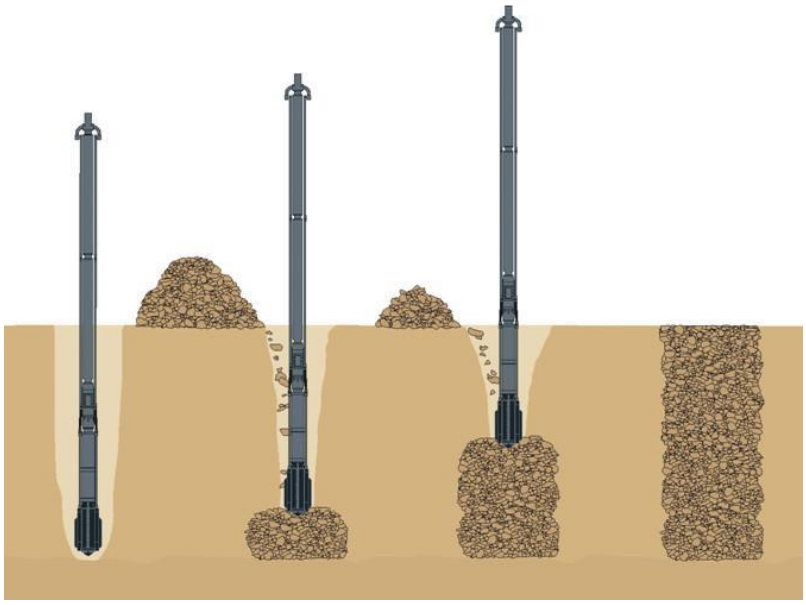
۵- مصالح مناسب پر کننده جهت روش ارتعاشی

بر اساس نشریه ۵۲۵ [۱۲] یک معیار با عنوان عدد تناسب[۲] معرفی شده است که تابعی از اندازهی قطر ذرات مصالح پرکننده بر اساس رابطه ذیل است:

$$\text{Suitability No.} = 1.7\sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2}+\frac{1}{(D_{20})^2}+\frac{1}{(D_{10})^2}}$$

که در آن D50, D20, D10 به ترتیب اندازه قطر ذرات متناظر با ۵۰، ۲۰ و ۱۰ درصد عبوری بر حسب میلیمتر می‌باشند.
جدول ۱ معیار ارزیابی مصالح پر کننده را بر اساس نشریه ۵۲۵ نشان می‌دهد.

2- Suitability number



شکل ۲ : مراحل بهسازی خاک به روش ستون خرده سنگی یا شنی

جدول ۱ : معیار ارزیابی مصالح پر کننده

عدد تناسب	۰-۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۳۰	۳۰-۴۰	> ۵۰
رتبه	عالی	خوب	متوسط	ضعیف	نامناسب

۶- دانه بندی مصالح مناسب پر کننده جهت روش زهکش‌های شمعی

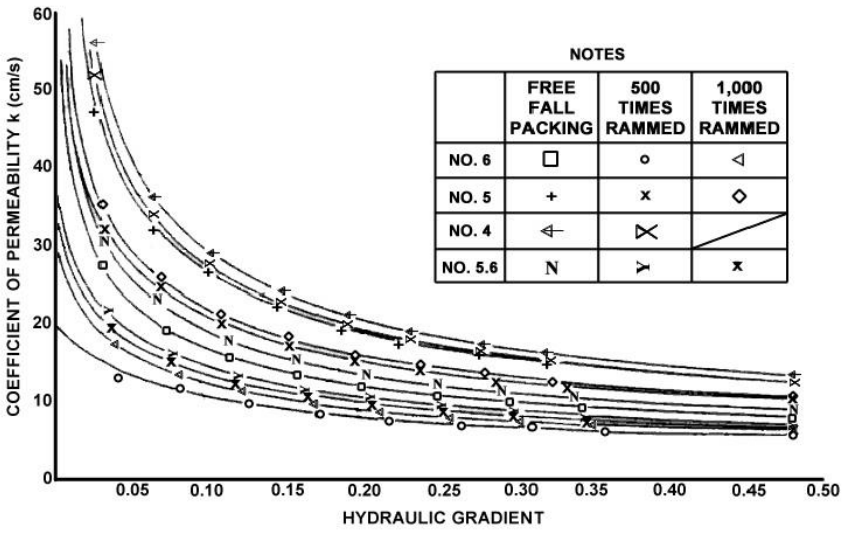
بر اساس نشریه ۵۲۵ روش‌هایی که از زهکش‌های شمعی متشکل از شن و سنگریزه استفاده می‌کنند نیز انواع گوناگونی دارند .یکی از این روش‌ها که عملکرد زهکشی را با تراکم ترکیب می‌کند، روش تراکم شنی[3] است. در این روش، با وجود تراکم، ممکن است خاک طبیعی مجاور زهکش در اثر لرزش‌های شدید ایجاد شده در طی نصب زهکش به صورت موضعی روانگرا شود .در نتیجه هنگام استفاده از این روش توجه دقیق به عدم انسداد سورا خهای زهکش در طی نصب آن ضروری است. روش‌های مختلف زهکشی به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده اند.

3- gravel compaction

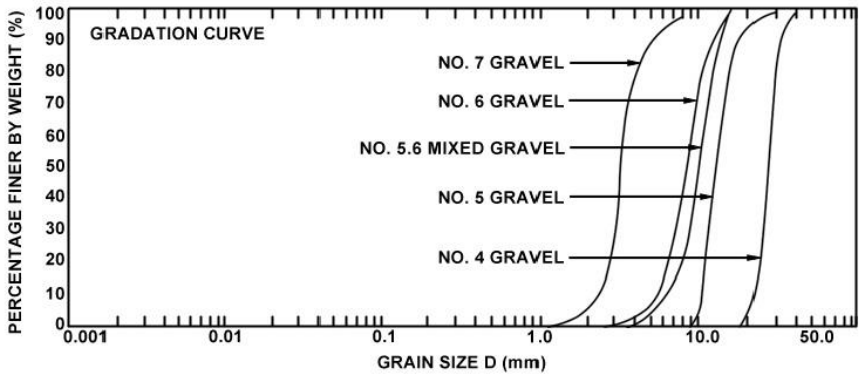
جدول ۲: انواع روش‌های زهکشی مورد استفاده به منظور بهسازی خاک در برابر روانگرایی

الف) انواع زهکش با توجه به شکل	زهکش شمعی زهکش دیواری منطقه‌ی زهکشی در اطراف سازه‌ها اتصال عمل‌گر زهکش به سازه‌ها
ب) انواع زهکش با توجه به مصالح مورد استفاده	زهکش شنی زهکش پلاستیکی
پ) انواع زهکش با توجه به روش نصب	روش متکی بر اثر زهکشی در زهکش روشی که همزمان با نصب زهکش تراکم خاک را نیز افزایش می‌دهد.

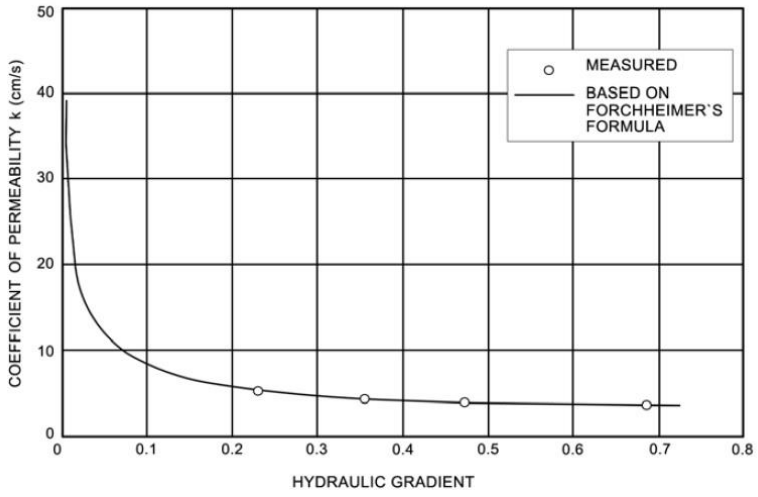
در روش شناورسازی ارتعاشی شن و مصالح خرده سنگی می‌تواند برای شکل‌گیری ستون‌های سنگی مورداستفاده قرار گیرد . این شیوه اجرا به ستون‌های شنی مورداستفاده در روش زهکشی شبیه است .هرچند، احتمال انتقال ماسه به داخل ستو نهای سنگی در طی اجرا زیاد است؛ بنابراین روش شناورسازی ارتعاشی با استفاده از شن و مصالح خرده سنگی تنها خاک زیرین را متراکم می‌کند و به‌صورت زهکش عمل نمی‌نماید. در صورت وجود سازه‌هایی که نیاز به تأمین ضرایب اطمینان بالا دارند، بهتر است به‌جای روش زهکشی از دیگر روش‌های بهسازی نظیر جایگزینی با مصالح پرکننده شنی وخرده سنگی استفاده شود. باتوجه‌به این مهم که در این روش، زهکشی مصالح هدف نهایی است در انتخاب مصالح مناسب در این روش ضریب نفوذپذیری و عدم انسداد طی فرایند نصب عامل اصلی در انتخاب مصالح پرکننده است. باتوجه‌به این مهم در طراحی این زهکش‌ها ضریب نفوذپذیری شن و سنگ‌ریزهٔ مورداستفاده در زهکش باید به‌صورت یک عدد حدودی ۱۰۰۰ برابر خاک طبیعی در محل باشد. جریان نشت به داخل زهکش ساخته شده از شن و سنگ‌ریزه در بسیاری از موارد جریانی آشفته است. ازاین‌رو ضریب نفوذپذیری شن و سنگ‌ریزه به گرادیان هیدرولیکی وابسته است .گرادیان هیدرولیکی رابطهٔ نزدیکی با نسبت اضافه فشار آب منفذی دارد به‌طوری‌که به‌عنوان یک تقریب محافظه‌کارانه در طراحی می‌توان آن را برابر با نسبت اضافه فشار آب منفذی مجاز در نظر گرفت. دانه‌بندی‌های پیشنهادی در شکل شماره (۳- ب) نشان‌داده‌شده است. مقصود ۵۰۰ و ۱۰۰ در شکل (۳- الف) ، تعداد معادل کوبیده شدن با یک وزنه ۴٫۵ کیلوگرمی است. شکل (۳- ج) نمودار دانه‌بندی مخلوط درشت‌دانه شماره ۷ است که در زمانی که احتمال انسداد به‌خاطر مقادیر بالای ریزدانه زیر الک ۲۰۰ وجود دارد مورداستفاده قرار می‌گیرد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: (الف) ضریب نفوذپذیری شن و مصالح خرده‌سنگی در ترازهای مختلف گرادیان هیدرولیکی تحت ریزش سقوط آزاد و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ بار کوبیده شدن توسط وزنه ۴,۵ کیلوگرمی (ب) دانه بندی شن و مصالح خرده‌سنگی مورد آزمایش (ج) ضریب نفوذپذیری مصالح درشت دانه شماره ۷ جهت استفاده درحالت احتمال انسداد [۱۲]

۷- دانه بندی مصالح مناسب پر کننده جهت اجرای ستون‌های ماسه‌ای

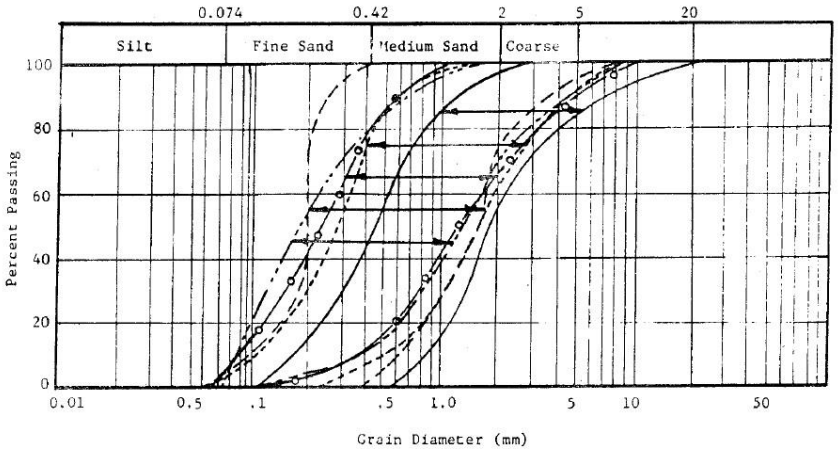
بر اساس یادداشت فنی REMR-GT-4 ارتش آمریکا [۱۳] شمع های متراکم شده ای ماسه‌ای را می توان برای بهسازی مکان های دارای لایه های ضعیف و سست به منظور پایداری، جلوگیری از روانگرایی، و کنترل نشست استفاده کرد. طبق این یادداشت فنی استفاده از ستون ماسه‌ای نسبت به ستون سنگی دارای معایب و مزایایی می باشد از مزایای آن می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- ماسه به طور قابل‌توجهی ارزان‌تر از مصالح خرده‌سنگی است.
- ساخت ستون‌های ماسه‌ای بسیار سریع است.
- به طور معمول در ساخت ستون‌های ماسه‌ای از یک غلاف فلزی استفاده می‌شود که احتمال ریزش حفره ایجاد شده را حذف می‌نماید.
- احتمال شسته شدگی و فرسایش خاک اطراف به درون ستون ماسه‌ای کاهش می‌یابد.

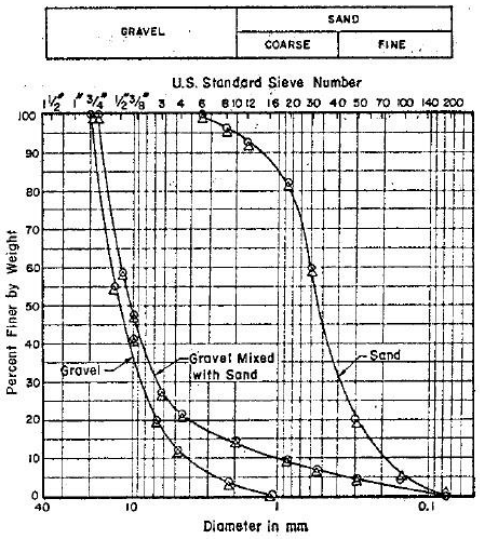
از معایب ستون ماسه‌ای نسبت به ستون سنگی می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- مصالح ستون‌های ماسه‌ای زاویه اصطکاک داخلی و مدل الاستیسیته کمتری نسبت به مصالح خرده‌سنگی دارند.
- استفاده از غلاف فلزی در نصب ستون‌های ماسه‌ای باعث دست‌خوردگی شدید در خاک پیرامونی گردیده و تحت‌تأثیر آن نفوذپذیری را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه عملکرد این ستون‌ها به‌عنوان زهکش بسیار کاهش می‌یابد.
- به علت نفوذپذیری کمتر، این ستون‌ها در مقایسه با مصالح خرده‌سنگی زهکشی کمتری را تحت بارهای زلزله انجام می‌دهند.

در خصوص دانه بندی تحقیقات مختلف نشان داده اند که مشابه ستون های خرده‌سنگی، وجود ریزدانه بیش از ۱۵ درصد به شدت باعث کاهش ظرفیت باربری و زهکشی ستون های ماسه‌ای می گردند [۱۱, ۱۳-۱۵]. همچنین با زبر تر شدن دانه بندی مصالح پر کننده، عملکرد ستون های ماسه‌ای بهبود قابل توجهی یافته است[۱۵].



(الف)



(ب)

شکل ۴: (الف)دانه بندی ستون ماسه‌ای مورد استفاده در ۵ مورد پروژه بهسازی در کشور ژاپن [۱۳] (ب) دانه بندی ستون ماسه‌ای مورد استفاده در نمونه های آزمایشی در تایلند [۱۱]

۸- دانه بندی مصالح مناسب پر کننده جهت اجرای ستون‌های شنی و خرده‌سنگی

عمده‌ترین عامل تعیین‌کننده در انتخاب نوع مصالح در ستون‌های شنی و خرده‌سنگی دردسترس‌بودن مصالح است. معمولاً از یک‌دانه بندی مصالح ۱۲ تا ۷۵ میلیمتری در ساخت ستون‌های شنی و خرده‌سنگی استفاده می‌شود [۲]. مشابه ستون های ماسه‌ای، وجود ریزدانه نیز تأثیر بسیار نامطلوبی در عملکرد ستون های شنی و خرده‌سنگی دارد و در مصالح سازنده ستون های سنگی مقدار ریزدانه باید حداکثر محدود به ۵ درصد گردد. جدول ۳ چهار نوع دانه بندی مصالح پیشنهادی توسط [۱۶] را نشان می دهد.

جدول ۳: دانه بندی مصالح پیشنهادی برای ساخت ستون‌های شنی و خرده‌سنگی [۱۶]

	% Passing			
Sieve Size (mm)	Fill Type 1	Fill Type 2	Fill Type 3	Fill Type 4
100	100	—	—	—
88	90–100	—	—	—
75	—	90–100	—	—
63	25–100	—	100	—
50	—	40–90	65–100	100
38	0–60	—	—	—
25	—	—	20–100	2
19	0–10	0–10	10–55	—
13	0–5	0–5	0–5	—

بر اساس پیشنهاد انجمن راه‌سازی آمریکا [۲] گزینه شماره ۱ و ۲ گزینه های اصلح می باشند. در خصوص مناطق دارای خاک بسیار ضعیف گزینه ۲ و ساخت سریع توصیه می گردد اما در صورت نگرفتن پاسخ مناسب گزینه ۳ باید مورد توجه قرار گیرد. در صورت در دسترس نبودن مصالح با اندازه بیش از ۵۰ میلیتر گزینه ۲ و ۴ پیشنهاد می گردد. بهرحال مصالح حاصل از سنگ شکن با چگالی و مقاومت سایشی و بار نقطه ای قابل قبول بر اساس مشخصات فنی پروژه گزینه بسیار مطلوب تر نسبت به سایر دانه بندی ها به خصوص مخلوط های طبیعی هستند. در مناطقی که در یک محل خاص یک توده بسیار ضعیف خاک وجود دارد بهتر است از یک دانه بندی با محدوده دانه ای درشت تر استفاده گردد.

۹- نتیجه گیری

استفاده از ستون‌های ماسه‌ای و ستون‌های شنی و خرده‌سنگی یک راهکار مناسب، اقتصادی و کارآمد جهت بهسازی خاک‌های ضعیف ریزدانه و درشت‌دانه است. ستون‌های ماسه‌ای علی‌رغم قیمت کمتر و سرعت اجرای بیشتر زاویه اصطکاک داخلی و مدل الاستیسیته کمتری نسبت به مصالح خرده‌سنگی دارند. استفاده از غلاف فلزی در نصب ستون‌های ماسه‌ای باعث دست‌خوردگی شدید در خاک پیرامونی گردیده و تحت‌تأثیر آن نفوذپذیری را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه عملکرد این ستون‌ها به‌عنوان زهکش بسیار کاهش می‌یابد. به علت نفوذپذیری کمتر، این ستون‌ها در مقایسه با مصالح خرده‌سنگی زهکشی کمتری را تحت بارهای زلزله انجام می‌دهند. بسته به نوع عملکرد مورد انتظار که می‌تواند زهکشی و کنترل روان‌گرایی یا کنترل نشست ویا هر دو این موارد باشد، نوع و دانه‌بندی مصالح تشکیل‌دهنده ستون‌های ماسه‌ای تأثیر قابل‌توجهی در عملکرد آن‌ها دارند. در صورت وجود لایه‌های بسیار ضعیف در یک پروژه، پیشنهاد می‌گردد که از محدوده‌های دانه‌بندی درشت‌دانه‌تر استفاده گردد. در خصوص ستون‌های ماسه‌ای میزان رد شده از الک ۲۰۰ می‌بایست به ۵ درصد و در خصوص ستون‌های خرده‌سنگی و شنی به ۱۵ درصد محدود گردد. یک دیگر از عوامل تأثیر گذار در انتخاب نوع مصالح پر کننده و همچنین نحوه اجرای ستون‌ها میزان مقاومت برشی زهکشی نشده خاک و درجه حساسیت آن است که می‌بایست در بررسی‌های تحت‌الارضی اولیه به‌دقت توسط متخصصین ذی‌صلاح موردتوجه قرار گیرد. در صورت عدم توجه به

موارد فوق، علی‌رغم تمام مزیت‌های عنوان شده در خصوص ستون‌های ماسه‌ای و خرده‌سنگی نمی‌توان عملکرد مطلوب و مورد انتظاری را در پروژه‌های بهسازی متصور بود.

۱۰- منابع

[۱]K. Mani, K.J.I.J.o.I.R.i.S. Nigee, Engineering, Technology, A study on ground improvement using stone column technique, 2(11) (2013) 6451-6456.
[۲]R.D. Barksdale, R.C. Bachus, Design and construction of stone columns, vol. I, Turner-Fairbank Highway Research Center, 1983.
[۳]N. Rajab, Sand columns stabilized with cement embedded in soft soil, M. Sc. Thesis, University of Technology, Baghdad, Iraq, 2013.
[۴]N.K. Al Saudi, A.S. Al-Gharbawi, N.A. Rajab, G.J.J.G.S.S.P. Tanyrbergenova, Sand and stone columns in soft soil at different relative densities, 2(62) (2016) 2121-2126.
[۵]C. Li, X. Lu, W. Wu, G.J.C. Mei, Geotechnics, An analytical solution for consolidation of soils with stone columns and vertical drains by considering the deformation of stone columns, 158 (2023) 105377.
[۶]X. Lu, C.J.C. Li, Geotechnics, An analytical solution for nonlinear consolidation of composite foundations improved by stone columns and vertical drains, 161 (2023) 105598.
[۷]S. Ashour, G. Ghataora, I.J.T.G. Jefferson, Behaviour of model stone column subjected to cyclic loading, 35 (2022) 100777.
[۸]Y.-G. Zhou, K. Liu, Z.-B. Sun, Y.-M.J.S.D. Chen, E. Engineering, Liquefaction mitigation mechanisms of stone column-improved ground by dynamic centrifuge model tests, 150 (20.۱۰۶۹۴۶ (۲۱
[۹]Z. You-xue, W. Rui, Z.J.工. Jian-min, Numerical investigation on liquefaction mitigation of liquefiable soil improved by stone columns, 36(10) (2019) 152-163.
[۱۰]P. Chen, W. Lyu, X. Liang, J. Deng, C. Li, Y.J.A.S. Yuan, Multi-Factor Influence analysis on the liquefaction mitigation of stone columns composite foundation, 12(14) (2022) 7308.
[۱۱]D.T. Bergado, F.L.J.S. Lam, foundations, Full scale load test of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand on soft Bangkok clay, 27(1) (1987) 86-93.
[۱۲]V.P.o.S. Supervision, T.s. affairs, Guideline for Assessment of Soil Liquefaction Potential, Consequences and Mitigation Methods, in, Vice President of Strategic Supervision Technical system affairs, Islamic Republic of Iran, 1391, pp. 411.
[۱۳]R.D. Barksdale, R. Barksdale, State of the art for design and construction of sand compaction piles, US Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg, MS, USA, 1987.
[۱۴]D. Rangeard, P. Phan, J. Martinez, S. Lambert, Mechanical behavior of fine-grained soil reinforced by sand columns: an experimental laboratory study, ASTM International, 2016.
[۱۵]Z. Li, J. Wan, K. Huang, W. Chang, Y.J.I.J.o.H. He, M. Transfer, Effects of particle diameter on flow characteristics in sand columns, 104 (2017) 533-536.
[۱۶]V. Elias, R. Lukas, D. Bruce, J. Collin, R. Berg, Ground Improvement Methods Reference Manual, in, Report No. FHWA NHI-04-001. Federal Highway Administration, July, 2004.