

# ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد ستون سنگی شناور ساخته شده با مصالح بازیافتی

Research Note

عبدالحسین حداد\* (دانشیار)

محسن شاهوردی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، گروه ژئوتکنیک، دانشگاه سمنان

در این تحقیق با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری محوری کوچک‌مقیاس، و جایگزین کردن مصالح بازیافتی با مصالح طبیعی در ساخت ستون سنگی، رفتار ستون سنگی شناور با مصالح بازیافتی برای بهسازی بستر رسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور ستون سنگی منفرد از سه گروه مصالح مختلف شامل: خرده‌آجر و خرده‌بتن و سنگدانه‌ی شنی ساخته شد. به منظور ارزیابی کیفیت مصالح بازیافتی، از آزمون‌های شاخص مصالح مثل ارزش خردشدگی سنگدانه و ارزش ضربه‌ی سنگدانه استفاده شد. نتایج آزمون‌های شاخص مصالح بازیافتی بیانگر عملکرد ضعیف این مصالح در مقایسه با سنگ‌دانه‌های طبیعی بوده‌اند. علیرغم این موضوع، ظرفیت باربری بستر رس مسلح به ستون شناور پر شده با خرده‌آجر یا خرده‌بتن تقریباً ۵ برابر ظرفیت باربری بستر رسی بدون ستون سنگی است. همچنین نتایج مدلسازی فیزیکی نشانگر آن است که ستون‌های سنگی شناور ساخته شده از یک نوع سنگدانه، عملکرد به مراتب بهتری از ستون ساخته شده از ترکیب چند نوع مصالح بازیافتی با یکدیگر یا ترکیب سنگدانه بازیافتی با سنگ‌دانه طبیعی دارند.

واژگان کلیدی: ستون سنگی، مصالح بازیافتی، خرده‌آجر، خرده‌بتن، بهسازی خاک.

## ۱. مقدمه

امروزه در ساخت سازه‌های ژئوتکنیکی مانند ستون سنگی، رعایت جنبه‌های محیط‌زیستی مورد توجه قرار گرفته است. ستون سنگی یک فرصت ایده‌آل، برای استفاده از سنگدانه بازیافتی را فراهم می‌کند.<sup>[۱]</sup> زیرا ساخت تعداد زیادی ستون سنگی، نیازمند منابع بسیاری از سنگدانه‌های طبیعی است. همین موضوع سبب می‌شود در مناطقی که با کمبود منابع سنگدانه طبیعی روبه‌رو هستند، از مصالح بازیافتی در ستون سنگی در کنار رعایت جنبه زیست‌محیطی آن استفاده شود. پژوهش‌های متعددی برای جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی، در زمینه‌های مختلف ساخت‌وساز انجام شده است.<sup>[۲-۶]</sup> که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب سنگدانه‌های بازیافتی‌اند. همچنین علاوه بر جنبه‌ی محیط‌زیستی که استفاده از مصالح بازیافتی فراهم می‌کنند، می‌توان از این مصالح در سازه‌های ژئوتکنیکی مانند ستون سنگی نیز بهره برد.<sup>[۷]</sup> با این حال نیاز به مطالعات بیشتر روی عملکرد این مصالح در سازه‌های ژئوتکنیکی احساس می‌شود.<sup>[۸]</sup> مطالعات انجام شده در زمینه‌ی به‌کارگیری سنگدانه‌های بازیافتی برای ساخت ستون سنگی را می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی کرد. ۱. بررسی یک جزء

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۷/۱۳۹۷، اصلاحیه ۱۸/۳/۱۳۹۸، پذیرش ۲۵/۴/۱۳۹۸.

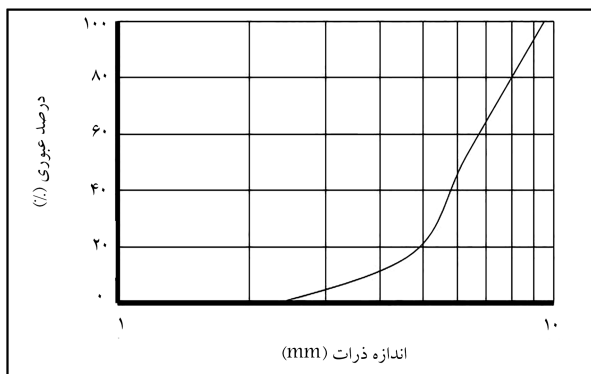
DOI:10.24200/J30.2019.51702.2429

یا بخشی از ستون سنگی؛ ۲. بررسی کل ستون سنگی. مکلوی و همکاران<sup>[۹]</sup> با استفاده از آزمایش برش مستقیم نشان دادند که نخاله‌ی ساختمانی و بتن خرد شده تحت اثر فشارهای زیاد تمایل به کاهش حجم دارند. سریع<sup>[۱۰]</sup> با استفاده از حدود ۴۵۰ تن بتن خرد شده بازیافت شده در یک پروژه‌ی اجرایی، عملکرد مناسب این مصالح را ستون سنگی و بالاست راه‌آهن گزارش کرد. جفرسون و همکاران<sup>[۱۱]</sup> پارامترهای مؤثر در استفاده از سنگدانه بازیافتی برای ساخت و اجرای ستون سنگی را گزارش کردند. همچنین استفاده از خرده‌لاستیک در ستون سنگی نیز می‌تواند نتایج قابل قبولی به همراه داشته باشد.<sup>[۱۲-۱۳]</sup> امینی<sup>[۱۴]</sup> با مدلسازی ستون سنگی اتکایی ساخته شده با مصالح بازیافتی نشان داد ترکیب خرده‌بتن و خرده‌آجر می‌تواند به عنوان مصالح پرکننده‌ی ستون استفاده شود. همچنین دمیر و همکاران<sup>[۱۵]</sup> با انجام مدل‌سازی آزمایشگاهی، نشان دادند که عملکرد ستون‌های ساخته شده با بتن بازیافت شده و سنگدانه طبیعی نزدیک به یکدیگر است. در تحقیق مدیروس - جونیر و همکاران<sup>[۱۶]</sup> پیشنهاد شده است که بتن ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی، به دلیل مقدار زیاد سیمان‌گذاری مقاومت فشاری قابل مقایسه‌ی با بتن ساخته شده با سنگدانه طبیعی دارد و از این مصالح می‌توان برای ساخت شمع‌های فشاری نیز استفاده کرد.

مطالعات انجام شده در این زمینه محدودیت‌هایی دارد. به عنوان مثال امینی<sup>[۱۴]</sup>



شکل ۱. تصویر تجهیزات آزمایشگاهی.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده برای ستون سنگی.

نمره ۲۰۰ عبور کرده است. بسترسی تا حدی ضعیف ساخته شده است تا ساخت مدل ستون سنگی در آن به سهولت انجام شود. بنابراین با توجه به مقاومت برشی کم بسترسی، می‌توان از ستون سنگی برای بهسازی بستر در این تحقیق استفاده کرد.<sup>[۲۰]</sup>

## ۲.۲. مصالح ستون سنگی

سه نوع مصالح شامل شن (به عنوان سنگدانه طبیعی)، خرده آجر و خرده بتن (به عنوان سنگدانه بازیافتی) برای مدل‌سازی ستون سنگی استفاده شده است. در این تحقیق بتن و آجر خرد شده از نخاله‌های ساختمانی تأمین شده است. قطعات بزرگ بتن و آجر به وسیله تجهیزات مکانیکی به گونه‌ی خرد شده‌اند که یک منحنی‌های دانه‌بندی مشابه داشته باشند. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های ستون سنگی در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق منحنی توزیع اندازه دانه‌ها، مصالح ستون‌های سنگی با اندازه ۲ تا ۹/۵ میلیمتر و با ضریب یکنواختی ۱/۷ هستند. مصالح ستون سنگی براساس سیستم طبقه‌بندی متحد<sup>[۲۱]</sup> در طبقه شن بدانه‌بندی شده (GP) قرار گرفته است.

برای محاسبه‌ی چگالی مصالح ستون سنگی، وزن مخصوص مصالح و وزن مخصوص بیشینه و کمینه‌ی مصالح، با استفاده از استاندارد ASTM<sup>[۲۲-۲۳]</sup> اندازه‌گیری شده که در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، چگالی مصالح ستون‌های سنگی در حالت متراکم است. در چگالی ۷۵/۲، زاویه‌ی اصطکاک سنگدانه‌های شنی، با استفاده از آزمایش برش مستقیم ۴۵ درجه حاصل شده است.

جدول ۱. برنامه آزمایش‌های مدل‌سازی ستون سنگی.

شماره‌ی آزمایش	نوع مصالح ستون	تراکم نسبی (درصد)
۱	-	-
۲	۱۰۰٪ شن	۷۵٫۲
۳	۱۰۰٪ خرده بتن	۷۴٫۲
۴	۱۰۰٪ آجر	۷۱٫۲
۵	۵۰٪ آجر + ۵۰٪ بتن	۷۴٫۲
۶	۴۰٪ آجر + ۴۰٪ بتن + ۲۰٪ شن	۶۷٫۷
۷	۲۵٪ بتن + ۲۵٪ آجر + ۵۰٪ شن	۷۳٫۱
۸	۱۰٪ بتن + ۱۰٪ آجر + ۸۰٪ شن	۷۷٫۴

تنها عملکرد مصالح بازیافتی در ستون سنگی اتکایی را بررسی کرده است. همچنین تأثیر به کارگیری ستون ساخته شده از ترکیب سنگدانه بازیافتی یا ترکیب سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی در تحقیقات دمپرو همکاران<sup>[۱۵]</sup> در نظر گرفته نشده است. به علاوه آزمایش‌های شاخص مصالح شامل ارزش خردشدگی و ارزش ضربه‌ی سنگدانه که به طور معمول برای ارزیابی مصالح ستون سنگی استفاده می‌شود<sup>[۱۷]</sup>، به صورت مستقیم نشان‌دهنده‌ی رفتار سازه نیستند؛ زیرا شرایط بارگذاری ستون سنگی را در نظر نمی‌گیرند و ممکن است مصالح در تعامل با مصالح دیگر رفتار متفاوتی از خود نشان دهند. بنابراین با قاطعیت نمی‌توان در این مورد اظهار نظر کرد که آزمایش‌های شاخص سنگ‌دانه‌ها، رفتار مصالح را در سازه ژئوتکنیکی شبیه‌سازی می‌کنند یا عملکرد مصالح در ستون اتکایی. بنابراین نیاز به انجام تحقیقاتی برای مرتفع کردن این محدودیت‌ها احساس می‌شود.

برای پوشش کاستی‌های ذکر شده، در این تحقیق عملکرد ستون سنگی شناور ساخته شده از یک نوع مصالح بازیافتی و ترکیب مصالح بازیافتی با مصالح اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، با روش‌های حل تحلیلی تحقیقات پیشین و مطالعات موردی، مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی و مصالح

به منظور ارزیابی رفتار ستون سنگی شناوری با مصالح بازیافتی و طبیعی، مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. جزئیات برنامه مدل‌سازی فیزیکی ستون سنگی در جدول ۱ ارائه شده است. ابتدا آزمایش‌های شاخص شامل ارزش خردشدگی سنگ‌دانه مطابق با استاندارد BSI<sup>[۱۸]</sup> و ارزش ضربه‌ی سنگدانه مطابق با استاندارد BSI<sup>[۱۹]</sup> انجام شده است. سپس آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ی روی مدل ستون سنگی شناور منفرد و بسترسی مسلح نشده انجام شده است. تصویر کلی از تجهیزات آزمایشگاهی برای ستون سنگی مدل‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۱.۲. مصالح بستر آزمایش

مشخصات شاخص بستر شالوده در جدول ۲ نشان داده شده است. مصالح مورد استفاده در بستر آزمایش متشکل از خاک رس است که بیش از ۷۵٪ آن از الک

جدول ۲. نتایج آزمایشهای شاخص بستر رسی.

شماره‌ی آزمایش	ویژگی‌ها	مقدار	استاندارد
۱	رطوبت بهینه (%)	۱۶	ASTM D۴۳۱۸
۲	رطوبت بستر آزمایش (%)	۳۰	ASTM D۴۳۱۸
۳	حد روانی (%)	۲۶٫۵	ASTM D۴۳۱۸
۴	حد خمیری (%)	۶	ASTM D۴۳۱۸
۵	شاخص خمیری (%)	۲۰٫۵	ASTM D۴۳۱۸
۶	چگالی ذرات جامد	۲٫۶۵	ASTM D۸۵۴
۷	درجه اشباع (%)	۸۰	
۸	بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک ( $kN/m^3$ )	۱۷٫۳	ASTM D۶۹۸
۹	وزن مخصوص خاک جعبه مدلسازی ( $kN/m^3$ )	۱۷	
۱۰	چسبندگی زهکشی نشده بستر آزمایش ( $kPa$ )	۵-۴	ASTM D۴۶۴۸
۱۱	نوع خاک	CL	ASTM D۲۴۸۷-۰۶

جدول ۳. چگالی مصالح ستون سنگی.

مصالح	وزن مخصوص ( $kN/m^3$ )		درصد تراکم
	کمینه	بیشینه	
شن	۱۶٫۴۲	۱۶٫۹۵	۹۶٫۹
خرده‌آجر	۹٫۵۱	۱۰٫۰۷	۹۴٫۴
خرده بتن	۱۳٫۱۴	۱۳٫۶۷	۹۶٫۱
۵۰٪ خرده‌آجر + ۵۰٪ خرده‌بتن	۱۱٫۳۷	۱۲٫۰۵	۹۴٫۴
۴۰٪ خرده‌بتن + ۴۰٪ خرده‌آجر + ۲۰٪ شن	۱۱٫۷۴	۱۲٫۲۸	۹۵٫۶
۲۵٪ خرده‌بتن + ۲۵٪ خرده‌آجر + ۵۰٪ شن	۱۳٫۱۳	۱۳٫۵۶	۹۶٫۹
۱۰٪ خرده‌بتن + ۱۰٪ خرده‌آجر + ۸۰٪ شن	۱۵	۱۵٫۴۲	۹۷٫۲

جدول ۴. نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ی سنگدانه‌ها.

شماره‌ی آزمایش	مصالح	AIV (%)	بیشینه‌ی مقدار توصیه شده در BRE
۱	شن	۱۵٫۲	
۲	آجر	۳۱٫۷	
۳	بتن	۲۶	۳۰٪
۴	۵۰٪ آجر + ۵۰٪ بتن	۲۹٫۲	

۳.۲. آزمایش ارزش ضربه‌ی سنگدانه (AIV)

آزمایش AIV مطابق دستورالعمل استاندارد BSI<sup>[۱۸]</sup> برای سنگدانه‌های شنی، خرده‌آجر، خرده‌بتن و ترکیب ۵۰٪ خرده‌آجر و ۵۰٪ خرده‌بتن انجام شده است و رفتار سنگدانه‌ها تحت اثر نیروهای ضربه‌ی با نتایج این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. درصد AIV با استفاده از معادله‌ی ۱ محاسبه می‌شود.

$$AIV(\%) = M_2/M_1 \quad (1)$$

که در آن  $M_1$  جرم کل سنگدانه‌ها برحسب گرم و  $M_2$  جرم مصالح عبوری از الک  $2.36\text{ mm}$  است.

نتایج آزمایش AIV برای سنگدانه‌های شنی، خرده‌بتن، خرده‌آجر و ترکیب مشابه خرده‌آجر و خرده‌بتن در جدول ۴ ارائه شده است. هر قدر درصد AIV بیشتر باشد، آسیب‌پذیری سنگدانه‌ها در برابر بارهای ضربه‌ی بیشتر است. آیین‌نامه‌ی BRE<sup>[۱۷]</sup> بیشینه خردشدگی ۳۰ درصد را شاخص پذیرش سنگدانه‌ها، برای استفاده در ستون سنگی توصیه می‌کند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که خرده‌آجر، آسیب‌پذیری بیشتر نسبت به سنگدانه شنی، خرده‌بتن و ترکیب مشابه خرده‌بتن و خرده‌آجر دارد.

۴.۲. آزمایش ارزش خردشدگی سنگدانه (ACV)

آزمایش ACV مطابق با دستورالعمل استاندارد BSI<sup>[۱۹]</sup>، برای مصالح ستون سنگی انجام شده است. به طور کلی در این آزمایش، بعد از آنکه مصالح شن، خرده‌آجر و خرده‌بتن با ابعاد گذرنده از الک شماره ۱۰ و مانده بر الک شماره ۱۴ آماده شده‌اند. بار با نرخ ثابت تا رسیدن به ۴۰۰ کیلو نیوتن در مدت زمان ۱۰ دقیقه به نمونه‌ها اعمال شده است. آزمایش ACV نشان‌دهنده‌ی رفتار سنگدانه‌ها، تحت بارگذاری بلندمدت است. هر قدر درصد ACV در معادله ۲ بیشتر باشد، ریزدانه‌های بیشتری

در سنگ‌دانه‌ها تحت اثر بارگذاری قرار خواهد گرفت.

$$ACV(\%) = M' / M'' \quad (2)$$

$M'$  جرم کل نمونه برحسب گرم و  $M''$  جرم مصالح عبوری از الک  $2/36$  میلیمتر است

در جدول ۵، نتایج آزمایش ACV برای سنگ‌دانه‌ها شنی، خرده‌آجر و خرده‌بتن درج شده است. نتایج آزمایش ACV نشان می‌دهد که برخلاف سنگ‌دانه‌ی شن، خرده‌بتن و ترکیب  $50\%$  خرده‌بتن و  $50\%$  خرده‌آجر که معیار قابل قبول آیین‌نامه‌ی BRE را کسب کرده‌اند، آجر معیار لازم برای استفاده در ستون سنگی را همانند آزمایش AIV را ندارد.

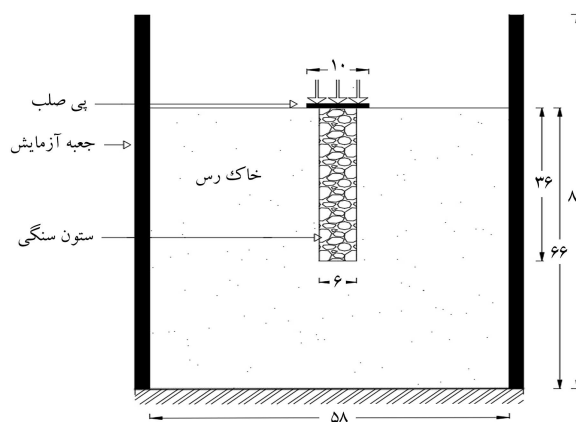
### ۳. مدلسازی و بارگذاری ستون سنگی

#### ۳.۱. طراحی مدل آزمایش

به دلیل تسریع در انجام آزمایش و کاهش هزینه و سهولت در انجام کار، مدل آزمایشگاهی با کاهش اندازه نسبت به مدل طبیعی ساخته شده که اثر مقیاس مدل نیز در نتایج مؤثر خواهد بود. مقیاس ابعاد جعبه آزمایش، روش ساخت و بارگذاری، مشابه با روش استفاده شده توسط داش و همکاران<sup>[۲۲]</sup> است. تصویر شماتیکی از مدل آزمایشگاهی ستون سنگی ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مدل‌سازی، قطر جعبه‌ی آزمایش  $580$  میلیمتر و ارتفاع آن  $880$  میلیمتر است. جعبه روی شالوده‌ی صلبی مستقر است که مانع هرگونه تغییر شکل کف جعبه آزمایش می‌شود. طول (L) و قطر ستون (d) به ترتیب  $360$  و  $60$  میلیمتر است که نسبت  $L/d = 6$  را برای مدل تأمین می‌کند. این نسبت

جدول ۵. نتایج آزمایش ارزش خردشدگی سنگ‌دانه.

شماره‌ی آزمایش	مصالح	AIV (%)	پیشینه‌ی مقدار توصیه شده در BRE
۱	شن	۲۳/۲	
۲	آجر	۴۵	
۳	بتن	۲۷/۷	۳۰
۴	$50\%$ آجر + $50\%$ بتن	۳۴	



شکل ۳. نمودار ستون سنگی در حالت شناوری (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).

## Archive of SID

طول بهینه‌ی ستون است و باعث به وجود آمدن گسیختگی انبساطی در ستون می‌شود.<sup>[۲۶-۲۴]</sup>

قطر پی (D) دایره‌ی صلب  $100$  میلیمتر و برابر با  $D = 1/6d$  است. این ابعاد پی تضمین می‌کند که کل ستون و خاک اطراف آن می‌تواند بعد از انبساط جانبی نیز تحت بارگذاری کامل قرارگیرد. به طور تقریبی، بهترین نسبت مساحت جایگزین (مساحت ستون به مساحت پی) بین  $30$  تا  $40$  درصد است.<sup>[۲۷]</sup> در این آزمایش، نسبت مساحت جایگزین  $36/0$  است. معمولاً در کارهای اجرایی قطر ستون سنگی  $6-10$  متر و اندازه دانه‌ها ( $d_s$ ) بین  $20$  تا  $50$  میلیمتر است. بنابراین در کارهای اجرایی به طور معمول نسبت قطر ستون سنگی به اندازه دانه‌ها بین  $12$  تا  $40$  است.<sup>[۲۸]</sup> در این مطالعه،  $d_s = 2$  میلیمتر و  $d = 9/5 - 60$  میلیمتر بوده که نسبت بین آنها بین  $6-30$  است

براساس مطالعات گذشته<sup>[۲۹،۳۰]</sup>، گسیختگی سطحی در بستر رس تا فاصله‌ی در حدود  $4$  تا  $5$  برابر عرض پی گسترش می‌یابد. به همین دلیل در این تحقیق برای کاهش اثر تنش‌ها بر مرز صلب، قطر جعبه آزمایش حدود  $6$  برابر قطر پی و حدود  $9/7$  برابر قطر ستون در نظر گرفته شده است. در اکثر آزمایش‌ها ارتفاع بستر آزمایش  $660$  میلیمتر و طول ستون سنگی  $360$  میلیمتر ثابت نگه داشته شده است. از آنجا که سطح گسیختگی زیر شمع تا حداکثر دو برابر قطر شمع ( $2d$ ) محدود می‌شود<sup>[۳۱]</sup>، در مدل آزمایشگاهی این تحقیق، فاصله‌ی نوک ستون تا بستر صلب  $5$  برابر قطر ستون ( $5d$ ) در نظر گرفته شده است و در نتیجه شناوری ستون تضمین می‌شود و شرایط مرزی تأثیر قابل توجهی روی نتایج نخواهد داشت.

#### ۳.۲. آماده‌سازی بستر آزمایش و استقرار ستون

برای ساخت بستر رسی ستون سنگی با مقاومت برشی زهکشی نشده کم، در گام اول قبل از ریختن خاک درون جعبه، مقداری معادل  $30\%$  وزن خاک خشک، آب به خاک اضافه و مخلوط شده است. سپس برای کاهش اصطکاک خاک با دیواره‌ی جعبه در هنگام نشست خاک، دیواره‌ی داخلی جعبه با سیلیکون‌گریس آغشته شده است. بعد از آن، کلوخه‌های رس با ضخامت لایه‌های  $10$  سانتیمتری درون جعبه قرار داده شده است. تراکم هر لایه با استفاده از وزنه‌ی  $3$  کیلوگرمی به قطر  $100$  میلیمتر انجام شده است. در گام نهایی برای به دست آمدن  $1$  درصد رطوبت معادل و یکنواخت در کل توده‌ی خاک، سطح بستر رسی با استفاده از یک پلاستیک پوشانیده و تا یک هفته رها شده است. چسبندگی زهکشی نشده‌ی بستر آزمایش تقریباً بین  $4 - 5 kPa$  است که به وسیله‌ی آزمایش برش پره (قطر پره  $10$  میلیمتر) محاسبه شده است. ستون سنگی در مرکز جعبه‌ی آزمایش با روش جایگذاری نصب شده است. به همین منظور قبل از جایگذاری لوله درون بستر خاک، دیواره‌ی داخلی و خارجی لوله با گریس چرب شده تا به آسانی درون بستر رسی فرو رود و از به هم خوردگی خاک اطراف جلوگیری شود. سپس با قرارگیری لوله‌ی PVC به قطر  $60$  میلی‌متر در مرکز جعبه‌ی آزمایش، لوله تا عمق  $360$  میلیمتر (ارتفاع ستون) با فشار دست مستقر شده و سپس خاک درون لوله خارج شده است. برای کمینه‌سازی مکش، حداکثر  $100$  میلیمتر خاک در هر نوبت، از داخل لوله برداشته شده است. در مرحله‌ی بعدی، مصالح تا ضخامت هر لایه  $50$  میلی‌متر در داخل لوله ریخته شده است. سپس با میله‌ی به وزن  $2$  کیلوگرم، تراکم سنگ‌دانه‌ها درون لوله انجام شده و پس از آن لوله را به آرامی بالا کشیده تا  $25$  میلی‌متر همپوشانی لوله بین سنگ‌دانه‌ها و خاک اطراف فراهم شود. در نهایت

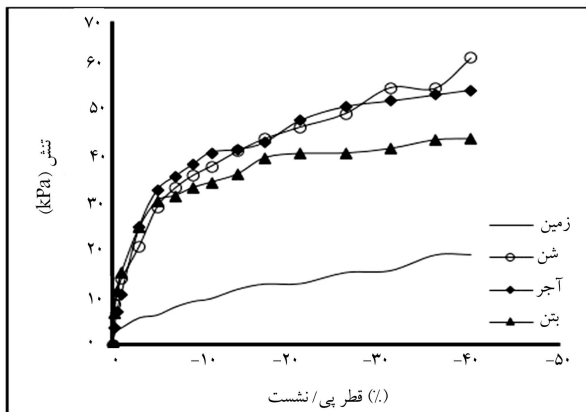
#### ۴. بحث و مقایسه

##### ۴.۱. رفتار ستون سنگی ها با یک نوع مصالح

در این تحقیق، عملکرد ستون ساخته شده از یک نوع مصالح بازیافتی و مصالح اصلی مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین منظور، منحنی تغییرات تنش باربری - نشست بهنجار ستون شنواری خرده آجر، خرده بتن، سنگ دانه شنی و زمین مسلح نشده در شکل ۶ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود، صرف نظر از نوع مصالح، تمامی ستون های سنگی باعث بهبود ظرفیت باربری پی شدند. در ابتدای بارگذاری، شیب نمودارها تند است و تمامی ستون های سنگی ابتدا سهم بیشتری از کل بار پی را تحمل کرده اند. این اختلاف بین منحنی های ستون سنگی با منحنی بستر رسی مسلح نشده، نشان دهنده تفاوت سختی بین مصالح ستون و خاک اطراف است. همچنین به دلیل خاصیت قفل و بست اولیه ی دانه های تحت فشار، تمامی ستون ها تنش های بیشتری از خاک تحت کرنش معادل تحمل کرده اند.

چنان که در شکل ۶ مشاهده می شود، تقریباً تا نشست بهنجار ۵ درصد، همه ی ستون ها رفتار مشابهی از خود نشان داده اند. این بدان معناست که ستون ها تا این نشست، تنش ها را به خاک اطراف انتقال ندادند. سپس شیب منحنی ستون ساخته شده از خرده بتن بعد از نشست ۵٪ کاهش یافته است، ولی ستون خرده آجری تا انتهای بارگذاری، معادل ستون شنی تنش را تحمل کرده است. این رفتار غیرمنتظره ی مصالح آجری و بتنی در ستون سنگی شنواری، می تواند ناشی از شرایط متفاوت حاکم بر مصالح در ستون شنواری، نسبت به شرایط حاکم بر مصالح در آزمایش های شاخص باشد.

با توجه به جدول ۳، اختلاف بین بیشترین و کمترین وزن مخصوص در مصالح آجری نسبت به دیگر مصالح کمتر است. و همین امر منجر به قفل و بست سریعتر سنگدانه ها تحت بارگذاری می شود و مقاومت اصطکاکی مصالح زودتر فعال می شود. سپس به علت این که مصالح آجری ضعیف اند، دانه های آجری زودتر دچار گرفتگی می شوند. در ستون سنگی، سازوکاری که در درجه ی اول سبب بهسازی می شود، انبساط ستون سنگی است. [۳۳] به علت خواص ضعیف خرده آجرها، پدیده ی انبساط جانبی ستون با خرده آجر نسبت به سایر مصالح در اعماق بیشتری از خاک رخ می دهد. از آنجا که با افزایش عمق خاک فشار سربار زیاد می شود، در این منطقه انبساط جانبی ستون با خرده آجر نسبت به سایر ستون ها بیشتر است و همین سبب می شود که نیروهای مقاوم خاک اطراف ستون درگیر شده و در نتیجه محصورشدگی



شکل ۶. تغییرات تنش باربری در نشست های پی برای ستون سنگی های شنواری ساخته شده با یک نوع مصالح.

این فرایند ادامه یافته است تا مصالح وزن شده به طور کامل در سطح بستر رس تمام شوند. در شکل ۴ پلان یک نمونه ستون سنگی ساخته شده نشان داده شده است.

##### ۳.۳. بارگذاری

یک جک هیدرولیکی با شرایط کنترل کرنش برای بارگذاری کوتاه مدت ستون و خاک اطراف استفاده شده است. قبل از بارگذاری کوتاه مدت، بستر شالوده با یک سربار  $275 \text{ kN/m}^2$  به مدت ۴ ساعت بارگذاری شده است. این کار به دلیل از بین بردن دست خوردگی موضعی و ایجاد شرایط یکنواختی در بستر آزمایش صورت پذیرفته است. [۳۴] سپس بارگذاری کوتاه مدت با سرعت  $2 \text{ mm/s}$  شروع و نشست پی اندازه گیری شده است. این نرخ سریع بارگذاری منجر به این خواهد شد که زاویه ی اصطکاک داخلی خاک به صفر تمایل پیدا کند و خاکی با مقاومت ضعیف شبیه سازی شود. [۳۴] در نهایت بارگذاری شالوده تا دستیابی به نشست ۲۰ درصد قطر پی ادامه یافته است.

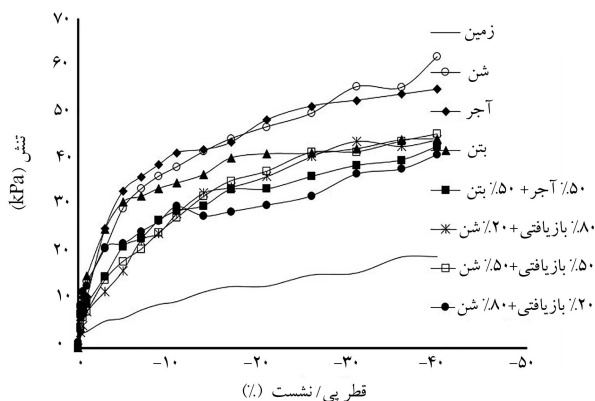
در شکل ۵ تجهیزات بارگذاری و اندازه گیری نشست به تصویر کشیده شده است. براین اساس، یک سلول بار با ظرفیت  $20000$  نیوتن و دقت  $0.2\%$  نیوتن بر روی شالوده قرار گرفته است. از طریق سلول بار الکترونیکی، بار جک هیدرولیکی انتقال داده شده به شالوده ثبت شده است. دو میدل برای اندازه گیری نشست پی صلب روی صفحه ی بارگذاری رو به روی هم قرار داده شده است. میدل های اندازه گیری نشست و سلول بار به یک وسیله ی ثبات داده ها متصل شده و این دستگاه داده ها را با سرعت ۱ ثانیه ثبت کرده است. در نهایت دستگاه ثبات داده ها به یک رایانه متصل شد.



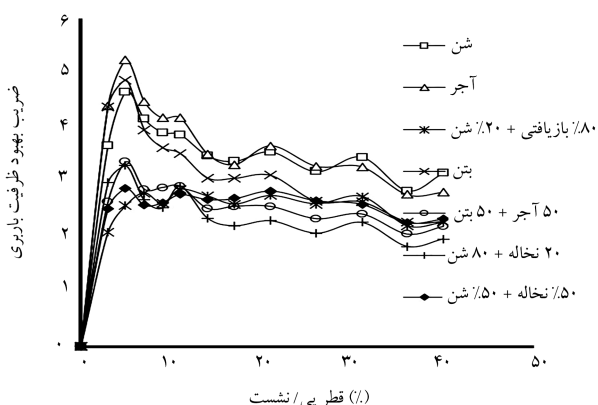
شکل ۴. تصویر یک نمونه ستون سنگی ساخته شده.



شکل ۵. تجهیزات بارگذاری و اندازه گیری نشست.



شکل ۸. تغییرات تنش باربری در نشست‌های پی برای ستون سنگی‌های شناوری ساخته شده با یک نوع مصالح و ترکیب چند مصالح.

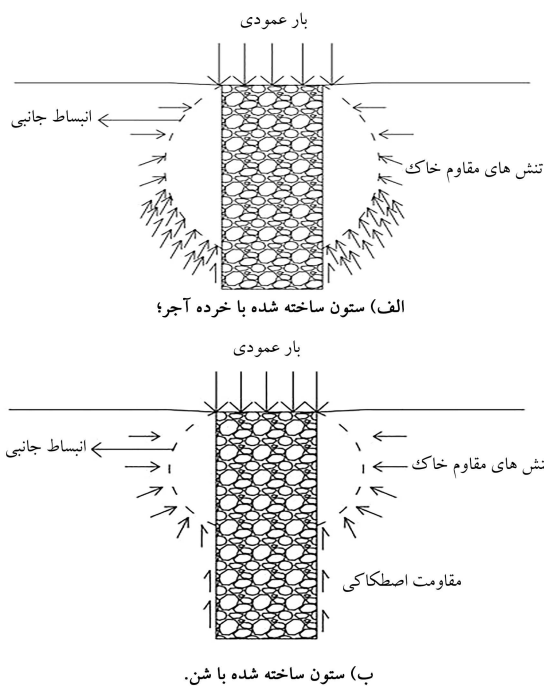


شکل ۹. تغییرات بهبود ظرفیت باربری بستر با ستون سنگی با نشست پی.

مدنظر است. اصطکاک بین مصالح و خاک محل می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت باربری شود. چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری مصالح شنی از سایر مصالح بیشتر است. همچنین ظرفیت باربری خرده‌آجر بیش از خرده‌بتن است که ناشی از سطح زیر مصالح خرده‌آجر ارزیابی می‌شود. شایان ذکر است که هدف بررسی عملکرد مصالح باز یافتی در ستون‌های سنگی است و طبیعتاً این مصالح نمی‌توانند تمامی شرایط مورد نظر را فراهم کنند و صرفاً با توجه به شرایط پروژه می‌توان از این مصالح استفاده کرد.

### ۳.۴. ضریب بهبود ظرفیت باربری (IF)

ضریب بهبود ظرفیت باربری (IF) برای سنجش میزان بهبود ظرفیت باربری بستر رسی مسلح به ستون سنگی، نسبت به بستر رسی مسلح نشده در یک نشست یکسان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۹ پاسخ تغییرات ضریب بهبود ظرفیت باربری با نشست بستر رسی مسلح به ستون‌های ساخته شده با یک نوع مصالح و ترکیب چند نوع مصالح نشان داده شده است. در ابتدای بارگذاری افزایش تندی در شیب IF مشاهده می‌شود. دلیل این موضوع آن است که ستون‌ها ابتدا سهم بیشتری از تنش‌ها را تحمل می‌کنند. سپس با افزایش نشست، شیب IF معکوس می‌شود که نشان‌دهنده انتقال تنش‌ها از ستون به خاک اطراف و به دلیل گرفتگی سنگدانه‌ها و در نتیجه انبساط بیش از حد ستون است. در ادامه نشست، منحنی با نوسانات افزایش باربری همراه است که می‌تواند به علت آرایش مجدد



شکل ۷. اندازه‌ی انقباض جانبی در ستون سنگی شناوری. [۱۴]

بیشتر رخ دهد و ظرفیت باربری افزایش یابد. به علاوه، تیز گوشه بودن مصالح آجری، می‌تواند در درگیر شدن خاک اطراف مؤثر باشد. در شکل ۷ شمایی از انقباض جانبی ستون سنگی ساخته شده از شن و خرده‌آجر نشان داده شده است. [۱۴]

### ۲.۴. مقایسه‌ی ستون‌های ساخته شده از یک نوع مصالح و ترکیب مصالح

ترکیب مصالح باز یافتی با سنگدانه‌های اصلی، به منظور دستیابی به درصد بهینه‌ی ترکیب مصالح باز یافتی با سنگدانه‌های طبیعی و مقایسه با ستون‌های ساخته شده از یک نوع مصالح انجام شده است. در شکل ۸ نمودار تنش‌های باربری زمین مسلح شده با ستون ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی شنی، خرده‌آجر، خرده‌بتن، ترکیب برابر خرده‌آجر و خرده‌بتن و ترکیب درصدهای مختلف سنگ‌دانه‌های شنی با خرده‌آجر و خرده‌بتن نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، ظرفیت باربری بستر پی با ستون‌های ساخته شده از ترکیب مصالح نیز افزایش یافته است. به طور کلی، تقریباً با هر درصد ترکیب شن با مصالح باز یافتی، ستون‌های شناوری یک نوع عملکرد را از خود نشان داده‌اند. همچنین عملکرد ستون‌های ساخته شده از یک نوع مصالح، مانند ستون ساخته شده از خرده‌آجر، خرده‌بتن یا سنگ‌دانه‌ی شنی، بهتر از ستون‌های ساخته شده از ترکیب چند نوع مصالح باز یافتی و اصلی است. این امر را می‌توان ناشی از تعامل و درگیری سنگ‌دانه‌هایی دانست که از یک جنس ساخته شده‌اند. همچنین علت دیگر آن را می‌توان قرارگیری مصالح ضعیف باز یافتی بین مصالح قوی شنی دانست که به موجب آن مصالح ضعیف سریعاً خرد و تبدیل به ریزدانه می‌شود و قفل و بست مناسبی با یکدیگر ندارند.

معیارهای AIV و ACV که در بخش قبل بیان شد، به‌عنوان معیارهای غربالگری اولیه مطرح است و توجه به سایر پارامترها نیز ضرورت دارد. در ستون سنگی پارامتر ظرفیت باربری مجموعه سیستم نیز در انتخاب مصالح مؤثر است. در ظرفیت باربری علاوه بر مقاومت مصالح، مقاومت سیستم، شامل خاک و مصالح،



معادله‌ی ۴ را می‌توان چنین بازنویسی کرد:

$$g(h_1, h_2, h_3, \dots, h_n) = g\left(\frac{L}{d}, k_o, \frac{c_u}{\gamma d}, \phi, \frac{Q}{\gamma d^3}\right) \quad (5)$$

اگر مقیاس هندسی مدل  $(1/n)$  باشد، آنگاه ابعاد هندسی مدل آزمایشگاهی مرتبه کوچکتر از واقعیت خواهد بود. به عبارت دیگر خواهیم داشت:

$$\frac{d_P}{d_M} = n \quad (6)$$

که  $d_P$  و  $d_M$  به ترتیب قطر ستون سنگی در شرایط واقعی و شرایط آزمایشگاهی هستند.

متغیر  $\left(\frac{Q}{\gamma d^3}\right)$  را می‌توان ظرفیت باربری بدون بعد نامید؛ براساس ارتباط بین مدل واقعی و مدل آزمایشگاهی خواهیم داشت:

$$\frac{Q_P}{\gamma_P d_P^3} = \frac{Q_M}{\gamma_M d_M^3} \quad (7)$$

که در آن  $Q_P$  و  $Q_M$  به ترتیب ظرفیت باربری پی در شرایط واقعی و شرایط آزمایشگاهی و  $\gamma_P$  و  $\gamma_M$  به ترتیب وزن مخصوص خاک در شرایط واقعی و شرایط آزمایشگاهی هستند. با فرض این که بستر خاکی استفاده شده در مدل و واقعیت دارای یک وزن مخصوص  $(\gamma)$  هستند [۲۸]

$$\frac{Q_P}{Q_M} = \frac{d_P^3}{d_M^3} = n^3 \quad (8)$$

بنابراین با ضریب  $1/n^3$ ، نیروی آزمایشگاهی با نیروی بارگذاری در مطالعات موردی [۳۹] مقایسه شده است. در جدول ۶ نتایج حاصل از مقایسه‌ی داده‌های نتایج مطالعات موردی با نتایج آزمایشگاهی ستون ساخته شده از سنگدانه‌ی شنی درج شده است. بیشترین بار تحمل شده توسط ستون شنی در نشست معادل (۰.۵٪) قطر، مشاهده می‌شود زیرا از این نشست به بعد، ستون شروع به انتقال تنش به خاک اطراف کرده است. چنان که مشاهده می‌شود نتایج آزمایشگاهی این تحقیق بسیار به نتایج هان و شولین [۳۹] و لیلیس و همکاران [۴۰] (که در شرایط مشابه ستون سنگی شناور بوده‌اند) نزدیک است؛ دلیل این موضوع را می‌توان به شباهت شرایط قرارگیری ستون در بستر رسی نرم در مدل آزمایشگاهی و مطالعات موردی نسبت داد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد ستون سنگی شناوری ساخته شده با سنگ‌دانه‌های باز یافتی و سنگ‌دانه طبیعی مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا ارزیابی اولیه‌ی مصالح از طریق آزمایش‌های شاخص ارزش ضربه‌ی سنگ‌دانه و ارزش خردشدگی سنگدانه انجام شد. سپس ستون‌های سنگی مدل‌سازی شده با سنگدانه‌ی باز یافتی و طبیعی تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند. یافته‌های اصلی نتایج آزمایش‌های شاخص مصالح و نتایج رفتار ستون سنگی شناوری بارگذاری شده، به طور خلاصه عبارت‌اند از:

- آزمایش‌های شاخص ارزش خردشدگی و ارزش ضربه‌ی سنگدانه‌ها نشان داده است که از سنگدانه‌ی شنی و خرده‌بتن می‌توان به عنوان مصالح پرکننده‌ی ستون سنگی استفاده کرد، ولی خرده‌آجر امتیاز کافی برای مصالح پرکننده ستون سنگی را کسب نکرده است.

دانه‌ها و سپس قفل و بست دانه‌های ستون سنگی و خاک پس از جابه‌جایی باشد.

به طور کلی شیب صعودی منحنی‌ها تا نشست ۵ درصد قطری افزایش یافته است، که این افزایش برای ستون‌های ساخته شده از یک نوع مصالح بیشتر از دیگر ستون‌ها با مصالح ترکیبی است. سپس با معکوس شدن شیب منحنی بعد از کرنش ۵ درصد، کاهش شیب در ستون ساخته شده از خرده‌بتن و خرده‌آجر، نسبت به سایر ستون‌ها سریعتر است. دلیل این موضوع را می‌توان به کمتر بودن سختی مصالح خرده‌بتن و خرده‌آجر، نسبت به سایر مصالح عنوان کرد. سپس با افزایش بار و با توجه به این که ستون سنگی، ستون انعطاف‌پذیر محسوب می‌شود، ستون‌ها و خاک در یک سطح کرنش مشابه تسلیم می‌شوند. [۲۶] بیشترین مقدار IF در شکل ۹ نشان می‌دهد ستون‌های ساخته شده از یک نوع مصالح تا حدود ۵ برابر و ستون‌های ساخته شده از ترکیب دو یا سه نوع مصالح تا حدود ۲ برابر در کرنش ۵٪ سبب افزایش ظرفیت باربری بستر رسی نرم شده‌اند. این مقدار IF دامنه‌ی قابل قبولی است که معمولاً بین ۲ تا ۶ است. [۳۵، ۳۴]

## ۴.۴. مقایسه‌ی مدل آزمایشگاهی با نظریه‌ها و مطالعات موردی

ظرفیت باربری نظریه‌ی مدل آزمایشگاهی زمین مسلح به ستون سنگی، به وسیله‌ی تحلیل ساده‌ی کد IS ۱۵۲۸۴ تخمین زده می‌شود. [۳۶] بیشترین فشار قابل تحمل توسط ستون سنگی براساس انبساط جانبی، با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_v = (\sigma'_{r_o} + \gamma c_u) k_{p, col} \quad (3)$$

که در آن  $k_{p, col} = \frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c}$  و  $\sigma'_{r_o} = \gamma k_o \gamma' D$  تنش مؤثر شعاعی اولیه است که مقدار آن برابر است.  $\phi_c$  زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی است که برای مصالح شنی در شرایط چگالی ستون سنگی برابر با ۴۵ درجه اندازه‌گیری شده است. خاک بستر آزمایش دارای  $C_u = 4 \text{ kPa}$ ،  $\gamma' = 17.2 \text{ kN/m}^3$  است. با فرض  $k_o = 1$ ، تنش تسلیم ستون سنگی برابر با  $\sigma_v = 98.5 \text{ kPa}$  است. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان برابر با ۲.۷۵، ظرفیت باربری مجاز  $q_{safe} = 39.4 \text{ kPa}$  به دست می‌آید. ظرفیت باربری نظری که خاک رس در شرایط زهکشی نشده می‌تواند تحمل کند برابر با  $Q_{safe} = C_u N_c / FS$  است که  $N_c$  برابر با ۵۷۱۴ در نظر گرفته شده است. با توجه به پارامترهای آزمایش  $Q_{safe} = 87.22$  و ضریب بهبود ظرفیت باربری نظری برابر با  $IF_{Th} = 4/8$  است که با IF آزمایشگاهی در شکل ۹ تطابق بسیار خوبی دارد.

اثر مقیاس را می‌توان به صورت نظری با استفاده از تحلیل‌های ابعادی تشریح کرد. اصلی‌ترین کاربرد تحلیل ابعادی را می‌توان ارتباط دادن رفتار مدل فیزیکی با واقعیت دانست؛ استفاده از یک قانون مقیاس مناسب از مطالعه‌ی حاضر را می‌توان با نمونه‌ی طبیعی مقایسه کرد. [۳۷] عملکرد ستون سنگی بستگی به پارامترهای فیزیکی شامل: قطر ستون سنگی ( $d$ )، ارتفاع ستون ( $L$ )، زاویه‌ی اصطکاک سنگ‌دانه و خاک ( $\phi$ )، وزن مخصوص خاک و سنگدانه ( $\gamma$ )، ضریب رانش افقی خاک ( $K_O$ ) و چسبندگی بستر خاک ( $c_u$ ) دارد. معادلات ۴ و ۵ بر سیستم شالوده حاکم‌اند.

$$F(Q, C_u, d, \gamma, \phi, L, k_O) = 0 \quad (4)$$

تابع  $F$  شامل ۷ پارامتر است که دارای دو بعد اصلی، یعنی نیرو ( $Q$ ) و طول ( $L$ ) است. پس با توجه به ۷ پارامتر مستقل، می‌توان ۵ متغیر بدون بعد نوشت. بنابراین

بار نهایی بر مدل در نشست قطری ۵٪	آزمایش میدانی هان [۳۹]	ضریب مقیاس (n)	ظرفیت باربری میدانی	ظرفیت باربری *(n) ظرفیت باربری مدل
۲۳۳(N)	$D = 800 \text{ mm}$ $L/D = 11,25$	$800,60 = 13,333$	۴۵۰ (kN)	۵۵۲ (kN)
	لیلس [۴۰]	$610,60 = 10,167$	۲۶۶ (kN)	۲۴۵ (kN)
	$D = 610 \text{ mm}$ $L/D = 4,9$			

به ستون ساخته شده از سنگ‌دانه‌ی شنی بیشتر است و تا اعماق پایین‌تر تمایل به انبساط جانبی مشاهده می‌شود. با توجه به این که فشار سربار در اعماق خاک بیشتر است، از این رو فشار مقاوم خاک بیشتری در اعماق ظاهر شده و محصورشدگی بیشتری پدید می‌آورد. بنابراین سختی مصالح در ستون شناوری به تنهایی عامل مؤثر در افزایش ظرفیت باربری نیست و انبساط حجمی ستون در اعماق پایین‌تر نقش مهمی در باربری ستون دارد.

• در این تحقیق مشاهده شد ظرفیت باربری ستون سنگی ساخته شده از سنگدانه‌ی طبیعی همراه با یک نوع مصالح بازیافتی عملکرد بهتری نسبت به ستون‌های ساخته شده از ترکیب چند نوع مصالح بازیافتی و طبیعی دارد.

- همه‌ی ستون‌های سنگی شناور صرف‌نظر از نوع مصالح به کار رفته در آنها، سبب افزایش ظرفیت باربری بستر شده‌اند و حداقل تا ۲ برابر ظرفیت باربری بستر افزایش داده شده است.
- نتایج بارگذاری کوتاه‌مدت نشان می‌دهد که ظرفیت باربری بستر رس مسلح شده با ستون‌های ساخته شده از خرده‌آجر، سنگدانه‌ی شنی و ستون حاوی خرده‌بتن تقریباً ۵ برابر بستر رس مسلح نشده است. نرخ افزایش و کاهش ضریب بهبود ظرفیت باربری در تمامی ستون‌ها تقریباً یکسان است.
- به دلیل ضعف مصالح خرده‌آجر، انبساط حجمی در ستون خرده‌آجری نسبت

### منابع (References)

- Egan, D. and Slocombe, B. "Demonstrating environmental benefits of ground improvement", *Ground Improvement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, **163**(1), pp. (2010).
- Rahman, M.A., Imteaz, M., Arulrajah, A. and et al. Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials", *Journal of Cleaner Production*, **66**, pp. 75-84 (2014).
- Disfani, M.M., Arulrajah, A., Haghghi, H. and et al. "Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, **68**, pp. 667-676 (2014).
- Santos, E.C., Palmeira, E.M. and Bathurst, R.J. "Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation", *Geotextiles and Geomembranes*, **39**, pp. 9-19 (2013).
- Yeung, A.T., Mok, K.Y., Tham, L.G. and et al. "Use of inert C&D materials for seawall foundation: A field-scale pilot test", *Resources, Conservation and Recycling*, **47**(4), pp. 375-393 (2006).
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M.W., and et al. "Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications", *Canadian Geotechnical Journal*, **49**(7), pp. 796-811 (2012).
- Basu, D., Misra, A. and Puppala, A.J. "Sustainability and geotechnical engineering: Perspectives and review," *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(1), pp. 96-113 (2014).
- Vieira, C.S. and Pereira, P.M. "Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. Resources", *Conservation and Recycling*, **103**, pp. 192-204 (2015).
- McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. and et al. "Shear strength of recycled construction materials intended for use in vibro ground improvement", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, **6**(2), pp. 59-68 (2002).
- Serridge, C.J. "Achieving sustainability in vibro stone column techniques", *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability (Vol. 158, No. 4, Thomas Telford Ltd, pp. 211-222 (December 2005).*
- Jefferson, I., Gaterell, M., Thomas, A.M. and et al. "Emissions assessment related to vibro stone columns", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, **163**(1), pp. 71-77 (2010).
- Ayothiraman, R. and Soumya, S. "Model tests on the use of tyre chips as aggregate in stone columns", *Pro-*



- ceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, **168**(3), pp. 187-193 (2015).
13. Mazumder, T., Rolaniya, A.K. and Ayothiraman, R. "Experimental study on behaviour of encased stone column with tyre chips as aggregates", *Geosynthetics International*, **25**(3), pp. 259-270 (2018).
  14. Amini, R. Physical Modelling of Vibro Stone Column Using Recycled Aggregates (Doctoral dissertation, University of Birmingham) (2016).
  15. Demir, S., Mokarram, F.R. and Ozener, P., *The Sustainable Design of Granular Columns Based on Laboratory Model Tests. In Geo-Chicago*, pp. 893-903 (2016)
  16. Medeiros-Junior, R.A., Balestra, C.E. and Lima, M.G. "Applicability of recycled aggregates in concrete piles for soft soil improvement", *Waste Management & Research*, **35**(1), pp. 56-64 (2017).
  17. BRE. Specifying Vibro Stone Columns. K. Watts. Garston: Building Research Establishment (2000).
  18. BSI. "Testing aggregates", Method for determination of aggregate impact value (AIV). London, UK: BSI Standards Publication. BS 812-112 (1990).
  19. BSI. "Testing aggregates", Methods for determination of aggregate crushing value (ACV). London, UK: BSI Standards Publication. BS 812-110 (1990).
  20. Wehr, J. "The undrained cohesion of the soil as criterion for the column installation with a depth vibrator", In International Symposium on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Vibratory Compaction, TRANSVIB (2006).
  21. Standard A. "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)", Annu B ASTM Stand (2010).
  22. ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", ASTM International (2006).
  23. ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", ASTM International (2006).
  24. Dash, S.K. and Bora, M.C. "Influence of geosynthetic encasement on the performance of stone columns floating in soft clay", *Canadian Geotechnical Journal*, **50**(7), pp. 754-765 (2013).
  25. Hughes, J.M.O., Withers, N.J. and Greenwood, D.A. "A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil", *Geotechnique*, **25**(1), pp. 31-44 (1975).
  26. McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. and et al. "Modelling vibrated stone columns in soft clay", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **157**(3), pp. 137-149 (2004).
  27. Black, J.A., Sivakumar, V. and Bell, A. "The settlement performance of stone column foundations", *Geotechnique*, **61**(11), pp. 909-922 (2011).
  28. Muir Wood, D., Hu, W., and Nash, D.F.T. "Group effects in stone column foundations: Model tests," *Geotechnique*, **50**(6), pp. 689-698 (2000).
  29. Selig, E.T. and McKee, K.E. "Static and dynamic behavior of small footings", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **87**(6), pp. 29-50 (1961).
  30. Chummar, A.V. and Vesic, A.S. "Bearing capacity theory from experimental results", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **99**(sm7), pp. (1973).
  31. Meyerhof, G.G. and Sastry, V.V.R.N. "Bearing capacity of piles in layered soils. Part 2. Sand overlying clay", *Canadian Geotechnical Journal*, **15**(2), pp. 183-189 (1978).
  32. Malarvizhi, S.N. "Comparative study on the behavior of encased stone column and conventional stone column", *Soils and Foundations*, **47**(5), pp. 873-885 (2007).
  33. Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. "Design and construction of stone columns volume II, appendixes", Federal Highway Administration, Washington, DC (1983).
  34. Aboshi, H, Ichimoto, E, Harada, K. and et al. "The composer-A method to improve the characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns", *In Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, pp. 211-216 (March, 1979).
  35. Goughnour, R.R. and Bayuk, A.A. "A field study of long term settlements of loads supported by stone columns in soft ground", *In Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement*, Paris pp. 279-285 (March, 1979).
  36. Indian Standard, I.S. "Design and construction for ground improvement-guidelines", Part 1: Stone columns. IS, 15284, 267-290 (2003).
  37. Fakher, A. and Jones, C.J. "Discussion: Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**(4), pp. 326-327 (1996).
  38. Pinto, M.I.M. and Cousens, T.W. "Modelling a geotextile-reinforced, brick-faced soil retaining wall", *Geosynthetics International*, **6**(5), pp. 417-447 (1999).
  39. Han, J. and Ye, S. "Field study of an oil tank on stone column ground", *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, **43**, pp.1113-1118 (1993).
  40. Lillis, C., Lutenegeger, A.J. and Adams, M. "Compression and uplift of rammed aggregate piers in clay", In Geo-Support 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems (pp. 497-507).