

تحلیل 3D سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی تسلیح شده با ژئوسینتیک با هدف کاهش نشست و ظرفیت روانگرایی و افزایش ظرفیت باربری

امیر شرقی^۱، محمد حسن کرمی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد

A.sharghi@shahed.ac.ir

mkarami@shahed.ac.ir

خلاصه

در برخی خاکها بدلیل وجود چالشهایی چون پتانسیل نشست بالا، فقدان ظرفیت باربری کافی و همچنین امکان وقوع روانگرایی بالا، نیاز به استفاده از شمع و یا ستون سنگی میباشد. اما پژوهشها نشان میدهد، در شرایط اجرای پی های شمع در خاکهای در معرض روانگرایی، شمعها در زمان وقوع روانگرایی در معرض شکست بوده و در شرایط استفاده از ستون سنگی، علیرغم مناسب و اقتصادی بودن، امکان افزایش ظرفیت باربری زمین به مقدار کافی وجود ندارد. برای غلبه بر این چالش میتوان از سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی استفاده کرد که با انجام زهکشی آب توسط ستونها و کاهش احتمال روانگرایی، ظرفیت باربری خاک نیز افزایش مییابد. این پژوهش تاثیر تسلیح ستون سنگی و تغییر قطر آنرا در کاهش ظرفیت روانگرایی خاک و نشست آن، و همچنین تاثیر آنرا در افزایش ظرفیت باربری کل مجموعه، در یک سیستم ترکیبی شمع و ستون، بصورت سه بعدی بررسی میکند. با توجه به تحلیل های انجام شده با مسلح سازی ستون سنگی، ظرفیت باربری مجموعه به طور موثری افزایش، روانگرایی و نشست نیز کاهش مییابند. همچنین افزایش قطر ستون سنگی تاثیر مستقیم بر باربری و کاهش نشست دارد بطوریکه با افزایش قطر ستون، ظرفیت باربری افزایش و نشست کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: ستون سنگی، روانگرایی، سیستم ترکیبی شمع و ستون، مسلح سازی، Flac 3D.

۱. مقدمه

یکی از روش های مورد استفاده برای افزایش ظرفیت باربری پی های سطحی واقع بر لایه های رس نرم، استفاده از ستون سنگی می باشد. در این روش ابتدا درون خاک رس نرم، با استفاده از فشار آب و ارتعاش، چاهی حفر می نمایند، سپس آن را با خاک درشت دانه پر می کنند. شن داخل گمانه، در زمان بالا کشیدن و بیارتور، بتدریج متراکم می شود. ذرات خاک درشت دانه مورد استفاده در ستون سنگی، سائیزی در حدود ۶ تا ۴۰ میلی متر دارند. ستون سنگی نیز معمولاً با قطر ۰٫۵ تا ۰٫۷۵ متر و با فواصل مرکز به مرکز ۱/۵ تا ۳ متر اجرا می شود. استفاده از ستون سنگی باعث کاهش نشست پی می شود. برای این ستون ها، عمق ۶ تا ۱۰ متر مؤثرترین عمق است اگرچه تا عمق ۳۰ متر هم اجرا شده اند [۱]. یکی از معایب استفاده از ستون های سنگی در خاک های دارای مقاومت پایین آن است که چنانچه خاک مورد نظر بسیار سست باشد به دلیل افزایش فشار جانبی ستون، و متورم شدن ستون و فشار به خاک احاطه کننده سست، ستون سنگی دچار گسیختگی میشود. در سال های اخیر به منظور افزایش کارایی خاک در پروژه های ژئوتکنیکی، از ژئوگریدها به عنوان پوشش تقویت کننده مناسب در خاک ها استفاده میشود. زیرا این مصالح دارای مقاومت کششی بالا و قفل شدگی قابل توجهی در ساختار شبکه ای خود با مصالح خاکی و دانه ای هستند [۲]. پژوهش های چندی در خصوص ستون های سنگی در داخل و خارج از کشور انجام پذیرفته است. از مجموعه پژوهش های انجام شده در داخل می توان به مقاله کیخسروپور و سروش (۱۳۹۱) اشاره کرد، که در آن با استفاده از تحلیل عددی سه بعدی، عملکرد گروه ستون های سنگی مسلح شده با ژئوسینتیک و میزان اثر روکش ژئوسینتیک در بهبود عملکرد ستون های سنگی از طریق مطالعه نتایج نشست و شکم دادگی بررسی شده است. در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای چون سختی روکش ژئوسینتیک، زاویه اصطکاک و مدول الاستیسیته مصالح ستون و طول روکش ستون های سنگی، بر رفتار گروه ستون ها پرداخته شده است [۳]. مکارچیان و حمیدی (۱۳۹۵) با انجام آزمایشهایی روی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه شاهد

مدل فیزیکی یک بستر رسی بهسازی شده با ستونهای سنگی غیرمسلح و مسلح به صورت قائم و با قطرهای مختلف، میزان بهبود ظرفیت باربری بستر رسی و تأثیر عوامل مختلف بر این موضوع را مورد بررسی قرار دادند [۴]. در سال ۹۵ نیز صمدی و گلشنی مقاله ای با عنوان عملکرد ترکیبی ستون سنگی و شمعها در خاکهای روانگرا تحت بار لرزه ای ارائه دادند که در آن به قطر مناسب و مکانیزم عملکرد این سیستم در هنگام زلزله پرداختند [۵]. در سال ۲۰۱۱ نیروگاهی در هند با سیستم ترکیبی شمع و ستون، در خاک هایی از جنس خاکستر آتش فشان با احتمال روانگرایی بالا و ظرفیت باربری کم اجرا شد که نتایج آن توسط راجو^۳ (۲۰۱۱) در یک مقاله ارائه شد. در این مقاله دو نوع آرایش و چند قطر متفاوت ستون های سنگی مورد بررسی قرار گرفته است [۶]. لمبرت و موهن^۴ (۲۰۱۳) در بررسی عملکرد موارد مختلف استفاده از ستونهای سنگی نتیجه گرفتند پروژه هایی که از ستون های سنگی در مناطق لرزه ای بین آغاز سال های دهه ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۳ استفاده کرده اند، نشان دهنده کارایی بسیاری خوب چنین سیستم هایی در برابر روانگرایی است [۷]. در تحقیقی که توسط علی و شاهو^۵ (۲۰۱۴) به صورت آزمایشگاهی انجام شده، ستون های سنگی توسط دیسک های دایره ای از جنس ژئوستیک مسلح سازی شدند و فاصله دیسک ها چندبار در طول آزمایش تغییر کرد و ستون در دو حالت شناور (فقط مقاومت پوسته ای) و مقاومت اتکایی آزمایش شد [۸]. باسک و اینداراتنا^۵ (۲۰۱۶) رفتار زمین های نرم مسلح شده با ستون های سنگی را تحت بارهای استاتیکی و سیکلیک و به کمک مدلسازی عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند [۹]. سوری و پراوین^۶ (۲۰۱۶) در خصوص نوع مصالح کاربردی برای ستون سنگی مطالعات آزمایشگاهی ای انجام دادند [۱۰]. هویانگ، فنگ و ونینگ^۷ و (۲۰۱۷) ثابت کردند که نظریه تحکیم در ستون های سنگی با نظریه کلاسیک تحکیم، به خصوص برای خاکبرداری و خاکریزی آزادراه ها و راهسازی، به دلیل فاصله زمانی بارگذاری هایی که در پروژه های راهسازی وجود دارد فرق می کند. آنها با محاسبات تئوریک مدلی جدید طراحی و ارائه کردند [۱۱].

با توجه به پژوهش های صورت گرفته موضوع ستون سنگی از جنبه های مختلف بصورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیقات در خصوص سیستم ترکیبی شمع و ستون، نه فقط ستونها غیرمسلح بوده و بیشتر وظیفه زهکشی را بعهده داشته اند، بلکه نقشی برای باربری آنها نیز در نظر گرفته نشده است. همچنین اثر نشست در این تحقیقات دیده نشده و به میزان تأثیر آن بر عملکرد سازه به صورت بسیار محدود اشاره شده است. نکته دیگر اینکه در تحقیقات محدود گذشته در مورد سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی، به نقش و تأثیر تسلیح ستون ها در این سیستم و اثر آن بر نشست سازه و ظرفیت باربری پرداخته نشده و مقایسه ای نیز بین آنها صورت نگرفته است. هدف این پژوهش بررسی تغییرات ظرفیت روانگرایی خاک، کاهش نشست، تغییرات ظرفیت باربری و همچنین تأثیر مسلح سازی دورگیر ستونهای سنگی در کاهش نشست و جابه جایی جانبی و افزایش ظرفیت باربری، در یک سیستم ترکیبی شمع و ستون با استفاده از مدل سازی عددی توسط نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D میباشد.

۲. نحوه مدل سازی

این مدل سازی به صورت سه بعدی و در محیط نرم افزار Flac 3D انجام پذیرفته است. به علت وجود اندرکنش پیچیده بین شمع ها و ستون سنگی و زمان بر شدن محاسبات ابتدا با بررسی چندین فاصله مختلف بین شمع ها و ستون سنگی، ابعاد ۸*۸ متر به عنوان ابعاد مناسب شمع ها و ستون سنگی که کمترین اندرکنش را دارند انتخاب شده است.

۱.۲ ابعاد کلی مدل

³ Raju

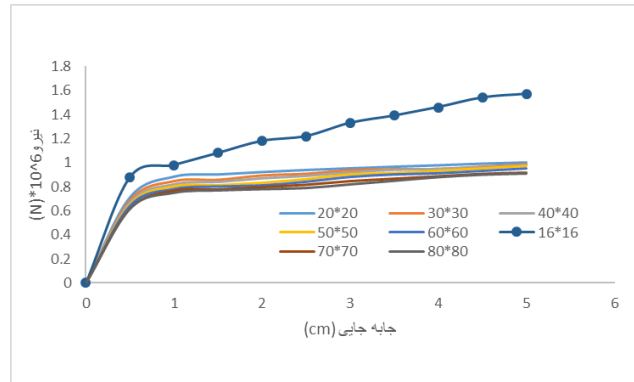
⁴ Lambert, mouhen

⁵ Bask, Indaratna

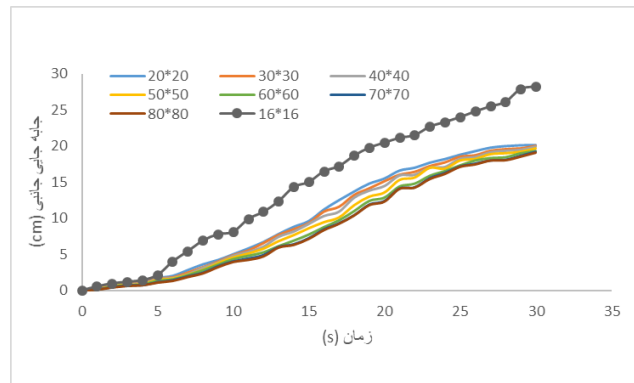
⁶ Suriya V., Praveen J.

⁷ Hoyang, Feng, Wenbing wu

ابعاد کلی مدل ۲۰*۲۰ متر انتخاب شده است. دلیل این انتخاب بررسی نتایج جابه جایی جانبی و نمودار بار-نشست بین ابعاد ۱۶*۱۶ تا ۸۰*۸۰ متر می باشد که بعد از ابعاد ۲۰*۲۰ تغییرات بسیار کم و محدود می شود. قطر ستون سنگی و شمع در حالت بررسی اولیه ۰٫۶ متر در نظر گرفته شده است و ارتفاع ستون و شمع ها نیز در بازه شمع کوتاه و به طول ۵ متر در نظر گرفته شده است.



شکل (۱) مقایسه نیرو-جابه جایی در ابعاد کلی متفاوت برای مدل



شکل (۲) مقایسه جابه جایی جانبی- زمان در ابعاد کلی متفاوت برای مدل

۲.۲ پارامترهای خاک، شمع و ستون سنگی

خاک مورد نظر ماسه نوادا و ستون سنگی نیز با توجه به مقاله صمدی و گلشنی [۵] نیز ماسه نوادا متراکم با مشخصات مندرج در جدول ۱ انتخاب شد. مشخصات ژئوتکستایل مصرفی جهت تسلیح ستون سنگی در جدول ۲ آورده شده، و کلاهیک بتنی روی شمع ها نیز از جنس بتن شمع ها می باشد (جدول ۳).

جدول (۱) مشخصات ماسه Nevada و ستون سنگی [۵]

پارامتر	تراکم متوسط	متراکم (ستون سنگی)
وزن مخصوص اشباع (kg/m ³)	1900	2100
مدول برشی مرجع (Mpa)	78.5	130
ضریب نفوذ پذیری (m/s)	6.6e-5	6.6e-5
زاویه اصطکاک (degree)	31	40
کرنش تسلیم روانگرایی	1%	0%
پارامتر ثابت c2	0.021	0.03
زاویه PT (درجه)	26.5	26
پارامتر اتساع d1	0.4	0.8
پارامتر اتساع d2	2	5

جدول ۲) مشخصات ژئوتکتایل مصرفی جهت مسلح سازی [5]

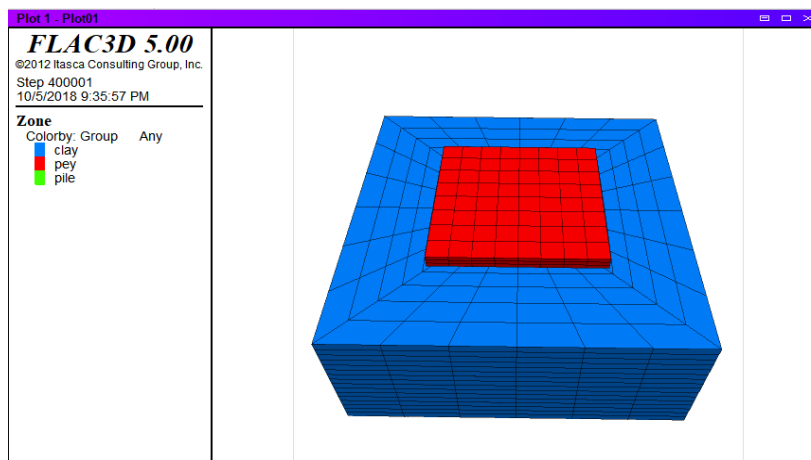
پارامتر	مقدار
نوع	ژئوتکتایل
جنس الیاف	پلی پروپیلن
مقاومت کششی نهایی (kN/m)	۱۴/۴
کرنش در مقاومت نهایی (%)	۱۴۰
سختی سکانت در کرنش نهایی (J) (kN/m)	۳۸
ضخامت (mm)	۳/۷
جرم واحد سطح (gr/m ²)	۵۰۰

جدول ۳) مشخصات شمع بتنی [5]

ماده	ارتفاع	قطر	I (m ⁴)	E (kN/m ²)
بتن	10	0.6	0.0063585	20000000

۳.۲ مدل رفتاری

با توجه به رایج بودن مدل موهر کلمب، این مدل برای خاک و ستون سنگی انتخاب شده و رفتار مکانیکی شمع ها و کلاهک بتنی نیز الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. شکل ۳ تصویری از کلاهک بتنی بر روی مدل کلی خاک را نشان می دهد.



شکل ۳) نمای کلی مدل در نرم افزار Flac 3D

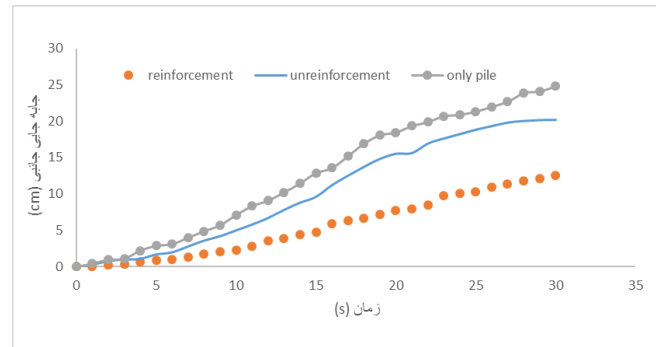
۴.۲ زلزله طرح

در این پژوهش زلزله ال سنترو^۸ به عنوان زلزله طرح انتخاب گردید. زمین لرزه ال سنترو در تاریخ ۱۹ مه ۱۹۴۰ میلادی، برابر با ۲۹ اردیبهشت ۱۳۱۹، ساعت ۴:۳۶:۴۸ به زمان یوتی سی در منطقه ال سنترو آمریکا رخ داد. ژرفای این زلزله ۱۵ کیلومتر و بزرگی آن ۷/۱ در مقیاس Ms اعلام شده است. زمان این زلزله در حدود ۳۰ ثانیه می باشد [۱۱]. این زلزله به دلیل در دسترس بودن اطلاعات و مشخصات در تحقیقات زیادی مورد استفاده قرار گرفته، لذا برای امکان مقایسه نتایج با پژوهشهای پیشین، از همین زلزله در این پژوهش نیز استفاده شده است. لازم بذکر است که منطقه ال سنترو دارای خاصیت روانگرایی می باشد.

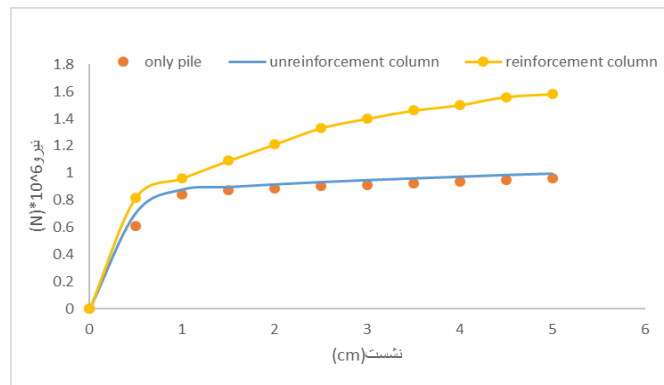
⁸ EL Centro

۳. حالت های مختلف تحلیل

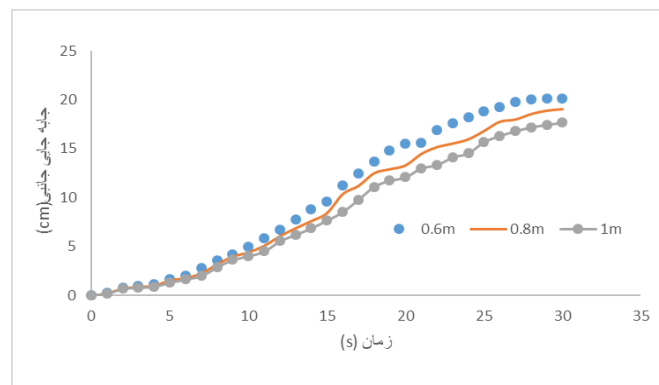
در این پژوهش چندین حالت مختلف-که با یکدیگر در وجود یا عدم وجود ستون سنگی، قطر ستون سنگی، مسلح بودن یا نبودن ستون سنگی با هم متفاوت می باشند- بررسی شده و نتایج آن ها که شامل نمودار تغییرات جابجایی جانبی نسبت به زمان، نمودار تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان قائم یا نشست سیستم ترکیبی شمع و ستون میباشد، در شکل های ۴ الی ۱۱ ارائه شده است. این نتایج در قالب مقایسه داده های مرتبط با حالات گفته شده با یکدیگر بیان شده اند. لازم به ذکر است که برای هر یک از حالت های ذکر شده، فایل و داده های مستقل با تحلیل نرم افزاری به صورت جداگانه انجام و ایجاد شده، سپس به مقایسه آنها پرداخته شده است.



شکل ۴) مقایسه جابجایی جانبی ناشی از روانگرایی در سه حالت: ستون سنگی غیرمسلح، ستون سنگی مسلح و بدون ستون سنگی



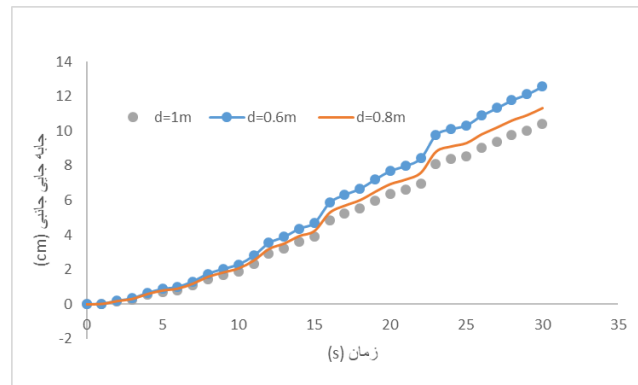
شکل ۵) مقایسه نمودار بار-نشست در سه حالت: ستون سنگی غیرمسلح، ستون سنگی مسلح و بدون ستون سنگی



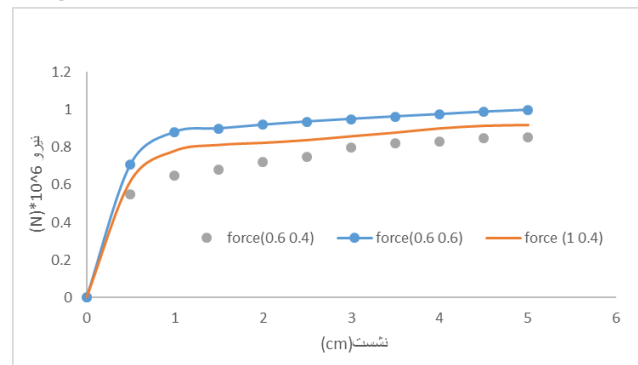
شکل ۶) مقایسه جابجایی جانبی ناشی از روانگرایی برای ستون غیر مسلح با سه قطر متفاوت: قطر ۰,۶ متر، قطر ۰,۸ متر و قطر ۱ متر

با توجه به شکل شماره ۴ و مقایسه جابه جایی جانبی سه حالت متفاوت فقط شمع بتنی، ترکیب شمع و ستون سنگی و ترکیب شمع و ستون سنگی تسلیح شده، مشاهده می شود که با اضافه شدن ستون سنگی جابه جایی جانبی مجموعه در زمان وقوع زلزله تقریباً تا ۲۰ درصد در مقایسه با حالت فقط شمع بتنی کاهش می یابد. این امر نشان می دهد که با زهکشی انجام شده توسط ستون سنگی سطح آب زیرزمینی پایین افتاده که خود باعث کاهش ظرفیت

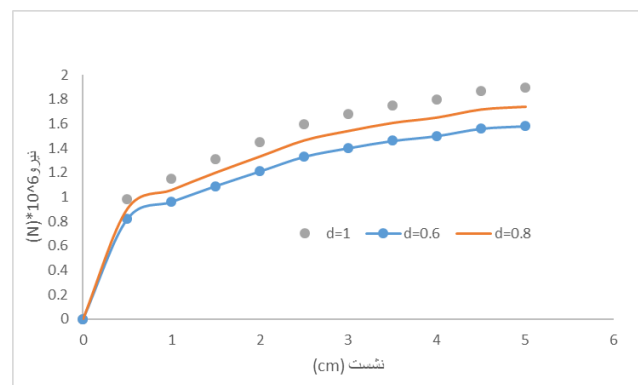
روانگرایی می شود. این نمودارها بخوبی روشن میسازند که مسلح سازی ستون سنگی در سیستم ترکیبی، می تواند جابه جایی جانبی را در موقع وقوع زلزله تا ۵۰ درصد کاهش دهد. شکل شماره ۶ تفاوت بین جابجایی جانبی ناشی از روانگرایی برای قطرهای مختلف ستون سنگی غیر مسلح در مجموعه ترکیبی شمع و ستون سنگی را نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش قطر ستون سنگی، جابه جایی جانبی در زمان وقوع زلزله کاهش می یابد، به طوری که با افزایش قطر از ۰٫۶ متر به ۰٫۸ متر، جابه جایی جانبی حدود ۱۲ درصد کاهش یافته و همینطور در افزایش قطر از ۰٫۸ به ۱ متر جابه جایی در حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است.



شکل ۲) مقایسه جابجایی جانبی ناشی از روانگرایی برای ستون مسلح با سه قطر متفاوت: قطر ۰٫۶ متر، قطر ۰٫۸ متر و قطر ۱ متر. شکل شماره ۷ همان مقایسه ۳ حالت قبل، با این تفاوت که ستون ها مسلح گشته اند، را نشان می دهد. طبق این نمودار افزایش قطر ستون سنگی در حالت مسلح اگرچه باعث کاهش جابجایی جانبی می گردد اما مقدار این کاهش به اندازه حالت غیر مسلح نیست. به طوری که با افزایش قطر از ۰٫۶ به ۰٫۸ متر در حدود ۱۰ درصد کاهش جابه جایی وجود دارد و در حالت افزایش از ۰٫۸ به ۱ متر حدود ۱۲ درصد کاهش جابه جایی رخ می دهد. به نظر میرسد به دلیل محصور شدگی بیشتر ستون سنگی، این حالت مقداری از ظرفیت زهکشی آن به دلیل بسته شدن خلل و فرج کاهش میدهد.

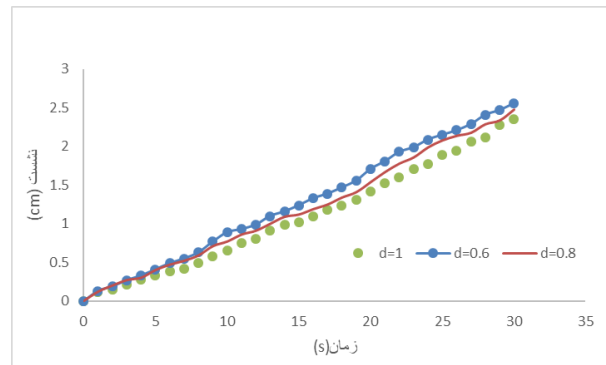


شکل ۸) مقایسه نمودار بار-نشست مجموعه برای ستون غیرمسلح با سه قطر متفاوت: قطر ۰٫۶ متر، قطر ۰٫۸ متر و قطر ۱ متر



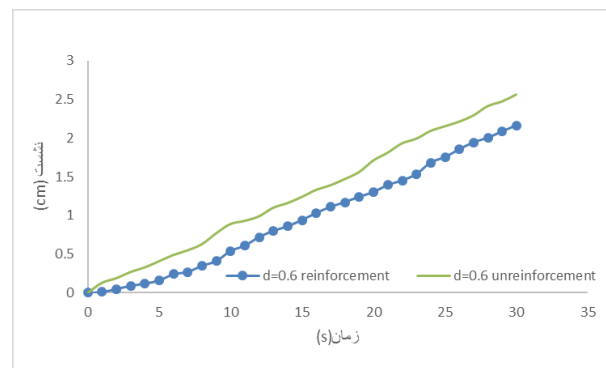
شکل ۹) مقایسه نمودار بار-نشست مجموعه برای ستون مسلح با سه قطر متفاوت: قطر ۰٫۶ متر، قطر ۰٫۸ متر و قطر ۱ متر

با توجه به شکل ۵ مشاهده می شود با اضافه شدن ستون سنگی غیر مسلح به مجموعه شمع های بتنی، در حدود ۱۰ درصد افزایش ظرفیت باربری رخ می دهد. ولی با مسلح سازی قائم ستون سنگی با ژئوتکستایل ظرفیت باربری مجموعه در حدود ۵۵ درصد افزایش می یابد. شکل شماره ۸ نشان می دهد که با افزایش قطر ستون غیر مسلح از ۰٫۶ به ۰٫۸ متر ظرفیت باربری مجموعه در حدود ۹ درصد و از ۰٫۸ به ۱ متر، این ظرفیت حدود ۷ درصد افزایش پیدا می کند. همچنین نمودار شکل شماره ۹ برای حالت مسلح نیز، افزایش باربری در حدود ۱۱ درصد برای همه حالت های گفته شده نشان می دهد. با توجه به نمودارها می توان به این نتیجه رسید که ستون سنگی غیرمسلح برای افزایش ظرفیت باربری مجموعه ترکیبی شمع و ستون سنگی گزینه مناسبی نیست، بلکه اگر افزایش ظرفیت باربری مجموعه مدنظر می باشد، بهتر است که این هدف با شمع های بتنی تامین شود و یا در صورت محدودیت فضا، از ستون سنگی مسلح، که ظرفیت بالاتری نسبت به ستون سنگی غیر مسلح دارد، استفاده کرد.



شکل ۱۰) مقایسه نشست مجموعه ترکیبی با سه قطر مختلف ستون غیر مسلح در هنگام زلزله

شکل شماره ۱۰ مقایسه نشست قائم مجموعه را در زمان وقوع زلزله با اقطار مختلف ستون سنگی نشان می دهد. طبق این نمودار با افزایش قطر ستون سنگی از ۰٫۶ متر به ۰٫۸ متر نشست قائم حدود ۱۲ درصد کاهش یافته و همچنین با افزایش قطر از ۰٫۸ به ۱ متر نشست قائم در حدود ۹ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۱) مقایسه میزان نشست در حالت ستون سنگی مسلح و غیر مسلح (با قطر ۰٫۶ متر) در زمان زلزله

شکل شماره ۱۱ نشست را در مسلح سازی و عدم مسلح سازی ستون سنگی در زمان وقوع زلزله بررسی می کند که نشان می دهد که با مسلح سازی ستون سنگی در زمان زلزله نشست قائم مجموعه در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش می یابد. با توجه به گفته های فوق می توان اینطور نتیجه گرفت که ستون سنگی در زمان عدم وقوع زلزله و تحت بار قائم، به دلیل صلب بودن شمع های بتنی و عدم وقوع روانگرایی، نشست قائم را به طور ناچیزی کاهش می دهد و مسلح سازی یا عدم مسلح سازی آن تاثیری در نشست نخواهد داشت ولی در زمان وقوع زلزله وجود ستون سنگی غیر مسلح نشست را حدود ۵۰ درصد و مسلح سازی آن نشست قائم را تا حدود ۲۰ درصد می تواند کاهش دهد. همچنین تاثیر قطر ستون سنگی نیز در زمان وقوع زلزله بیشتر است و تا حدود ۱۲ درصد می تواند به کاهش نشست قائم کمک کند.

۴. نتیجه گیری

- اضافه شدن ستون سنگی غیر مسلح به سیستم گروه شمع باعث کاهش ۲۰ درصدی جابه جایی جانبی مجموعه می شود.
- مسلح سازی ستون سنگی در مجموعه ترکیبی شمع و ستون سنگی می تواند باعث کاهش جابه جایی جانبی تا ۵۰ درصد شود.
- افزایش قطر ستون سنگی باعث کاهش ۱۲ تا ۱۵ درصدی جابه جایی جانبی مجموعه ترکیبی می شود.
- اضافه شدن ستون سنگی غیر مسلح به مجموعه ترکیبی باعث افزایش باربری تا ۱۰ درصد میشود ولی با مسلح سازی ستون سنگی می توان این افزایش را تا ۵۰ درصد بالا برد.
- افزایش قطر ستون سنگی در حالت غیرمسلح باعث افزایش حدود ۷ درصدی باربری ولی در حالت مسلح شده حدود ۱۱ درصد است.
- وجود ستون سنگی غیر مسلح در مجموعه ترکیبی شمع و ستون سنگی نشست حاصل از زلزله و روانگرایی را نسبت به حالت فقط شمع پتئی میتواند تا ۵۰ درصد کاهش دهد.
- در نشست حاصل از زلزله و روانگرایی افزایش قطر ستون سنگی باعث کاهش حدود ۹ تا ۱۲ درصدی می شود ولی با مسلح سازی قائم ستون سنگی می توان نشست را تا ۲۵ درصد کاهش داد.

۴. مراجع

۱. قضاوی، نظری افشار (چاپ سوم ۱۳۹۳)، "طراحی و روش اجرای ستونهای سنگی". انتشارات دانشگاه خواجه نصیر. تهران
۲. تبرساز، سروش (۱۳۸۹)، "تحلیل عددی رفتار زمین مسلح شده با گروه ستون سنگی"، مجله علمی - پژوهشی عمران مدرس، دوره دهم شماره ۲ صفحات ۳۴-۳۹، تهران، ایران
۳. کیخسرویپور، سروش (۱۳۹۲)، "مطالعه اثر ستون سنگی روکش شده در تقویت خاک های سست با استفاده از تحلیل عددی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ایران
۴. مکارچیان، حمیدی (۱۳۹۵)، "بررسی آزمایشگاهی و عددی ظرفیت باربری پی بر روی ستون سنگی تسلیح شده به صورت قائم با ژئوسینتتیک"، اولین کنفرانس ملی کاربرد کامپوزیت در صنعت ساختمان، دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی
۵. صمدی، گلشنی (۱۳۹۵)، "بررسی عددی تأثیر ستون سنگی و شمع در کاهش پتانسیل روانگرایی"، دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه صنعتی قم، قم
6. Raju V.R. (2011), "ground improvement using vibro techniques in fly Ash deposits", 2thNational Conference on Recent Advances in Ground Improvement Techniques, India
7. Lambert Serge, Bohn Cecilia (2014), "Case Studies of Stone Columns Improvement in seismic areas", Germany International conference of geotechnical engineering, berlin, Germany
8. Sharma K, Shahu H. (2014), "Model tests on stone columns reinforced with lateral circular discs", International Journal of Civil Engineering Research, India, Vol 5 (No 2), PP 97-104
9. Basack H., Indraratna B. (2016), "Analysis of the behavior of stone column stabilized soft ground supporting transport infrastructure", American Society of Civil Engineers journal, Vol 143 (No 3), PP 347-354
10. Suriya V., Praveen J.,(2016), "performance of clay soil with different materials in stone column", International Research Journal of Engineering and Technology, india, Vol 11 (No 3), PP 71-77
11. Feng H., Wenbing Wu. (2017), "Consolidation theory for a stone column composite foundation under multistage loading", Hindawi publishing corporation mathematical problems in Engineering, China