



ارزیابی کاهش روانگرایی خاک‌های لایه‌ای ماسه‌ای اشباع با استفاده از ستون‌های سنگی: بر پایه‌ی مدل‌سازی سه بعدی

علی عسگری*^۱، محمد کاظمی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

:

Email address: a.asgari@umz.ac.ir

خلاصه

به‌طور معمول سازه‌هایی که در نواحی لرزه‌خیز و نزدیک ساحل بر روی خاکهای سست احداث می‌شوند مستعد خرابی ناشی از پدیده روانگرایی هستند. یکی از روشهای کارا و اقتصادی جهت کنترل این پدیده، استفاده از ستون‌های سنگی می‌باشد. در این پژوهش برای ارزیابی لرزه‌ای و اثر بخشی ستون‌سنگی، مدل‌سازی سه‌بعدی در گروه‌های نامحدود و با فواصل مختلف در خاک قابل روانگرا به کمک نرم‌افزار OpenSeesv.2.5.0 انجام شده است. مدل سه‌بعدی خاک و ستون‌سنگی تحت زلزله‌های مختلف قرار داده شد و تاثیر پارامترهای ضخامت لایه خاک سست H_{1f} و موقعیت لایه خاک سست H_{sf} ، مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: روانگرایی، ستون‌سنگی، خاک قابل روانگرا، گسترش جانبی، مدل‌سازی سه‌بعدی

۱. مقدمه

یکی از مسائل مهم در طراحی سازه‌های واقع در نواحی ساحلی لرزه‌خیز (به‌طور مثال مناطق شمالی کشور ایران)، وجود مسأله روانگرایی^۱ در خاک‌های ماسه‌ای اشباع می‌باشد. پدیده روانگرایی در نتیجه وقوع زلزله و به دلیل نداشتن فرصت کافی جهت زهکش شدن آب حفره‌ای رخ می‌دهد. کنترل این پدیده به دلیل احداث سازه‌های مهم در نواحی ساحلی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مشاهده تخریب و شکست پی‌های عمیق و در پیامد آن تخریب سازه-های واقع بر روی این پی‌ها در اثر روانگرایی و گسترش جانبی در زلزله‌های گذشته لزوم شناخت کامل اثرات این پدیده را بر روی پی‌های عمیق آشکار ساخته است. روش‌های زیادی جهت کنترل وقوع روانگرایی وجود دارد که یکی از روش‌های کارا استفاده از ستون‌های سنگی^۲ در ابعاد و فواصل مناسب می‌باشد. مطالعات پاسخ لرزه‌ای ستون‌سنگی در خاک روانگرا و به خصوص طی پدیده گسترش جانبی و همچنین بهسازی خاک، هم اکنون یکی از موضوعات اصلی پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای به شمار می‌رود. اخیراً بررسی‌های زیادی در مورد اثر بخشی ستون‌های سنگی بر روی روانگرایی خاک انجام شده است که در ادامه به بررسی مواردی از این پژوهش‌های انجام شده خواهیم پرداخت. در ادامه، این نوشتار به صورت بخش‌های زیر دسته بندی و ارائه خواهد شد. ابتدا مروری بر پژوهش‌های انجام شده خواهد شد. سپس به مشخصات هندسی و خصوصیات مکانیکی مدل اشاره می‌شود و در بخش بعدی به بحث و بررسی در مورد نتایج عددی پرداخته خواهد شد. در نهایت به طور اختصار نتیجه‌گیری این پژوهش ارائه می‌شود.

¹ Liquefaction

² Stone columns

۲. روش پژوهش

۲-۱. مروری بر پژوهش‌های انجام شده

مهندسان ژئوتکنیکی پژوهش‌های گسترده‌ای را برای درک و مشخص کردن کاربردهای مختلف ستون‌سنگی و ارزیابی اثربخشی آنها در برابر پدیده روانگرایی، از طریق آزمایش‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام دادند. نخستین بار کاساگراند [1] پدیده روانگرایی ماسه و اثرات آن را معرفی کرد. وی از فرضیه تخلخل بحرانی برای نشان دادن شرایطی که موجب وقوع روانگرایی می‌گردد استفاده نمود. کاساگراند توضیح داد ماسه‌ای که تخلخلی بزرگتر از تخلخل بحرانی دارد وقتی که تحت برش واقع شود تمایل به کاهش حجم خواهد داشت و این در شرایط زهکشی نشده که امکان تغییر حجم وجود ندارد، برعکس ماسه‌ای که نسبت تخلخلی کوچکتر از تخلخل بحرانی دارد، درحین برش گرایش به انبساط داشته و این امر در شرایط زهکشی نشده موجب کاهش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه افزایش تنش موثر می‌شود، بنابراین مقاومت و پایداری ماسه افزایش می‌یابد.

مارتین و بیز [2] تأثیر ساخت ستون‌های سنگی به روش جایگزینی ارتعاشی^۱ را در کاهش اثرات روانگرایی با استفاده از آزمایشات صحرایی تمام مقیاس مورد بررسی قرار دادند. طی این آزمایشات مشاهده شد که خاک اطراف ستون‌ها به دلیل فشار شدن به اطراف و نیز روانگرایی ایجاد شده در اثر لرزش‌های ناشی از روش ساخت مورد نظر، متراکم شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که ساخت ستون‌های سنگی به روش ذکر شده تأثیر چشمگیری در پیشگیری و کاهش اثرات روانگرایی داشته است.

دوبری و لیو [3] نشان دادند که پاسخ سازه‌هایی که در خاک مستعد روانگرایی احداث شده‌اند، به ویژگی‌های حرکت زمین لرزه، نوع خاک، عمق و ضخامت لایه‌های مستعد روانگرایی، نوع فونداسیون، همچنین نسبت ارتفاع به عرض و جرم اینرسی سازه حساس هستند.

عسگری و همکاران [4] اثرات ستون‌های سنگی و شمع کوبی در کاهش پتانسیل روانگرایی در طول زلزله‌ها را به صورت پارامتری بررسی کردند. آن‌ها تأثیر پارامترهایی نظیر نسبت سطح جایگزینی A_{pr} ، نفوذپذیری ستون‌سنگی و خاک، زاویه شیب زمین، قطر ستون‌سنگی و ویژگی‌های زلزله را بر روی جابه‌جایی جانبی خاک، فشار آب مازاد حفره‌ای و تنش برشی بررسی کردند.

هانگ و همکاران [5] با انجام آزمایش میز لرزان بهسازی زمین برای مقابله با روانگرایی را با استفاده از گروه 3×3 ستون‌سنگی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از ستون‌سنگی به دلایل ۱- افزایش تراکم و سختی خاک اطراف ۲- زهکشی در طول ستون‌سنگی و ۳- کاهش تنش برشی کلی خاک اثر بخشی خوبی برای مقابله با روانگرایی خاک در برابر زلزله دارد.

الارته و همکاران [6] عملکرد سازه سه طبقه با پی‌های سطحی بر روی یک پروفیل خاک اشباع شده از جمله یک لایه نازک مستعد روانگرایی را بررسی کردند. آنها تأثیر سه تکنیک بهسازی مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند: ۱- تراکم خاک ۲- بهسازی با زهکش‌های عمودی پیش ساخته^۲ (PVDs) ۳- تقویت با دیوارهای سازه‌ای داخل زمین. مشاهده شد که تراکم خاک^۳ تا حدودی فشار آب مازاد حفره‌ای و نشست دائمی فونداسیون را کاهش می‌دهد. استفاده از PVDs باعث کاهش نشست دائمی و چرخش فونداسیون می‌شود، اما باعث تقویت شتابهای سطحی می‌شود.

عبدالقادر و همکاران [7] مدل شالوده سطحی بر روی خاک ماسه‌ای سست بهسازی شده با ستون‌های سنگی را بررسی کردند. شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در زیر فونداسیونی که تحت تنش‌های عمودی ناشی از اضافه بار قرار گرفته و فشار آب مازاد حفره‌ای زیادی در خاک ایجاد می‌شود، احداث ستون‌سنگی در این موارد باعث بهبود پارامترهای مختلف خاک می‌شود، که یکی از اثرهای احداث ستون‌سنگی، کاهش پدیده روانگرایی می‌باشد.

جین چی لو و همکاران [8] تأثیر وجود یک لایه خاک سست در عمق ۳ تا ۳.۳ متری را بر روی جابه‌جایی جانبی، فشار آب مازاد حفره‌ای، تنش-کرنش برشی و پاسخ شتاب جانبی زمین، با وجود بهسازی خاک توسط ستون‌سنگی با ضریب نفوذپذیری‌های مختلف و همچنین بدون حضور ستون‌سنگی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج بدست آمده، مشخص شد که وجود لایه سست باعث تشدید اثرات ناشی از پدیده روانگرایی شد و همچنین ضریب نفوذپذیری بالای ستون‌سنگی موجب کاهش اثرات ناشی از پدیده روانگرایی گردید.

۲-۲. مدل‌سازی عددی

¹ Vibro-replacement

² Prefabricated vertical drains

³ Densification

در این پژوهش برای مدل‌سازی و آنالیز، از نرم‌افزار کد متن باز اجزای محدود اپنسیس [9] استفاده شده است. مشخصات خاک، روش تحلیل و معادلات ساختاری در این نوشتار مطابق با پژوهش‌های انجام شده در قبل [10] است که در اینجا به اختصار توضیح داده می‌شود:

۲-۲-۱. مشخصات خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش با خصوصیات ماسه نوادا [11] و تراکم نسبی ۴۰ درصد در شرایط روانگرایی، با المان آجری شکل ۸ گره‌ای و مدل رفتاری دراکر-پراگر چند سطحی همبسته^۱ شبیه‌سازی شده است. یک لایه ماسه روانگرا با مقاومت برشی بسیار پایین با ضخامت متغیر و با عمق‌های متفاوت در بین پروفیل خاک ماسه‌ای اشباع یکنواخت قرار گرفته است. ضریب نفوذپذیری خاک نوادا و خاک سست به ترتیب $(k = 6.6 \times 10^{-5} \text{ m/s})$ و $(k = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s})$ در نظر گرفته شده است. عمق خاک در این مدل‌سازی ۱۰ متر در نظر گرفته شده است [10] و لایه خاک سست با ضخامت‌های ۰.۵ و ۱ و ۲ متری در عمق‌های ۲ و ۵ و ۸ متری از سطح زمین قرار داده شده‌اند. در این پژوهش پارامترهای H_{sr} و H_{lr} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$H_{lr} = \frac{H_1}{H} \quad (1)$$

$$H_{sr} = \frac{H_s}{H} \quad (2)$$

که در آن H ارتفاع کل پروفیل خاک، H_1 ضخامت لایه ماسه سست و H_s عمق لایه ماسه سست از سطح زمین می‌باشد. برای افزایش ثبات روش عددی، یک سطح نسبتاً پایین از میرایی رابلی با ضریب سختی اولیه ۰.۰۰۳ برای خاک نوادا 3×10^{-5} برای خاک سست استفاده شده است. مقاومت پسماند برای ماسه سست ۴.۵ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است تا پایداری استاتیکیک تامین شود [12] مشخصات خاک استفاده شده برای مدل‌سازی در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مدل خاک [8]

Very loose sand	Medium sand	Sc	پارامتر
۱۷۰۰	۱۹۷۰	۱۹۷۰	وزن مخصوص (kg/m^3)
۵۵	۷۸.۵	۷۸.۵	مدول برشی مرجع (MPa)
۲۹	۳۱.۴	۳۱.۴	زاویه اصطکاک (درجه)
۲۹	۲۶.۵	۲۶.۵	زاویه PT (درجه)
۰.۳۵	۰.۳	۰.۳	پارامتر ثابت (c_1)
۰.۰	۰.۴	۰.۴	پارامتر اتساع (d_1)
۰.۰	۰.۲	۰.۲	پارامتر اتساع (d_2)
1×10^{-5}	6.6×10^{-5}	$1 - 1 \times 10^{-4}$	ضریب نفوذپذیری (m/s)
۱۰	۱۰	۱۰	l_1
۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	l_2
۱	۱	۱	l_3

¹ Pressure Depend Multi Yield

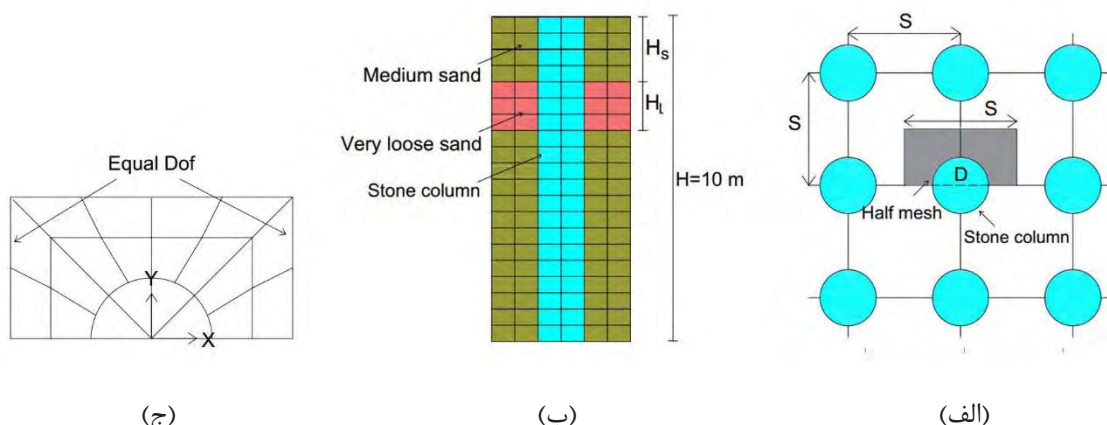
۲-۲-۲. مشخصات ستون سنگی

برای مدل‌سازی ستون سنگی در گروه‌های بزرگ و نامحدود، امکان شبیه‌سازی به طور کامل وجود ندارد، بنابراین پژوهشگران اغلب به جای مدل‌سازی کلی، یکی از ستون‌های سنگی را با در نظر گرفتن شعاع تاثیر آن با مرز تکرار شونده شبیه‌سازی می‌کنند [5] نحوه مدل‌سازی هندسی و شکل مش‌بندی ستون سنگی و خاک اطراف آن در شکل ۱ آورده شده است. به دلیل تقارن در بارگذاری و هندسه، نیمی از مدل مطابق شکل ۱-ج به عنوان نماینده یک منطقه بزرگ زمین بهسازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی ستون سنگی از مشخصات خاک نوادا استفاده شده است.

برای مدل‌سازی ستون سنگی از مشخصات خاک نوادا استفاده شده است. با این تفاوت که در ستون سنگی از ضریب نفوذپذیری ۰.۱ استفاده شده است. در موارد بهسازی شده توسط ستون سنگی، نسبت سطح جایگزینی A_{π} به طور معمول به عنوان نسبت مساحت ستون سنگی A_r به مساحت خاک A تعریف شده است که به صورت زیر تعریف می‌گردد [5, 10]:

$$A_{\pi} = \frac{A_r}{A} = \frac{\pi D^2}{4S^2} \quad (3)$$

که در آن D قطر ستون سنگی و S فاصله بین مراکز ستون سنگی است. در این مقاله نسبت سطح جایگزین شده ۰.۱ و ۰.۲ و ۰.۴ برای بررسی مدل‌های ایجاد شده در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- مدل‌سازی اجزاء محدود سه‌بعدی، الف-نمای شماتیک پلان مدل خاک و ستون سنگی، ب-نمای جانبی ستون سنگی در خاک و نحوه مش‌بندی، ج-پلان مدل‌سازی ستون سنگی و خاک اطراف و مرزبندی آن جهت تحلیل در اینپس

۲-۲-۳. روش تحلیل

در این پژوهش از تحلیل سه‌بعدی همبسته دینامیکی در حوزه زمان استفاده شده است. خاک اشباع بر اساس نظریه بیوت [13] به صورت یک محیط دو فاز در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی رفتار محیط متخلخل اشباع از فرمولاسیون $U-P$ استفاده شده است. پارامتر U معرف جابجایی خاک و پارامتر P معرف فشار سیال می‌باشد. به عبارت دیگر تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای بر جابجایی و برعکس؛ تغییرات جابجایی با فشار سیال مرتبط است.

۲-۲-۴. مشخصات زلزله

مدل‌های مختلف، تحت زلزله‌های السنترو ۱۹۴۰ و لوماپریتا ۱۹۸۹^۱ با بیشینه شتاب مقیاس شده به ۰.۲۵g قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های این دو زلزله در جدول شماره ۲ و همچنین تاریخچه زمانی شتاب افقی آنها در شکل شماره ۲ نمایش داده شده است. این دو زلزله به دو دلیل اصلی زیر انتخاب شدند:

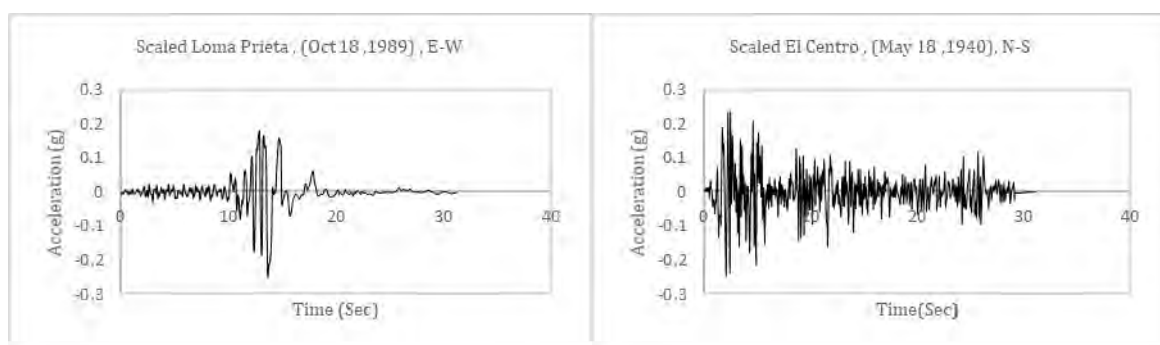
الف- این دو زلزله باعث ایجاد پدیده روانگرایی گسترده در زمان خود گردیدند.

ب- این دو زلزله شکل تاریخچه زمانی شتاب متفاوتی دارند، زلزله السنترو دارای ۱۴.۵ سیکل معادل است، در حالی که زلزله لوما پریتا تقریباً دارای ۵.۸ سیکل معادل است.

ج- هر دو زلزله در زمان ۳۰ ثانیه اتفاق افتاده‌اند، در حالی که محتوی فرکانسی متفاوتی دارند.

جدول ۲- مشخصات زلزله برای تحلیل پارامتری [5]

پارامتر	السنترو ۱۹۴۰	لوما پریتا ۱۹۸۹
تاریخ رخداد	۱۹۴۰/۵/۱۸	۱۹۸۹/۱۰/۱۸
ایستگاه ثبت کننده	117 El Centro	Treasure Island
بزرگی زلزله (M_w)	۷.۱	۶.۹۳
بیشینه شتاب افقی (MHA)	۰.۳۱۴	۰.۱۶
زمان تناوب غالب (T_p)	۰.۵	۰.۶۲
مدت پایه (D5-95)	۲۳.۸۴	۴.۴
زمان بیشینه شتاب افقی (t_p)	۲	۱۳.۶
PGV/PGA	۰.۱۱۳	۰.۲۱۹
شدت آریاس برای بیشینه شتاب افقی مقیاس شده به ۰.۳۵g	۲.۱۷۵	۱.۷۴۰
شار انرژی برای بیشینه شتاب افقی مقیاس شده به ۰.۳۵g	۲۴۶۹	۵۷۸۴
تعداد سیکل معادل قابل توجه	۱۴.۵	۵.۸



شکل ۲- تاریخچه زمانی شتاب افقی برای زلزله السنترو ۱۹۸۹ و لوماپریتا ۱۹۴۰ مقیاس شده به ۰.۲۵g

¹ El Centro (1940)

² Loma Prieta (1989)

۳. اعتبار سنجی

جزء کلیدی این مدل سازی، اعتبارسنجی مدل خاک به کار رفته در شرایط روانگرایی و پاسخ به گسترش جانبی است [8]. شبیه سازی های گزارش شده، با استفاده از نرم افزار کد متن باز اجزاء محدود OpenSees و با کمک رابط گرافیکی OpenSeesPL در مدل سه بعدی خاک توسط عناصر آجری ۲۰-۸ گره ای انجام شده است. همچنین خاک توسط مواد Pressure Depend Multi Yield اپنسیس شبیه سازی شد. نتایج بدست آمده در اعتبارسنجی، مشابه نتایج مندرج در پژوهش فوق می باشد.

۴. بحث در مورد نتایج عددی

در این بخش به اثرهای ستون سنگی در پاسخ لرزه ای خاک روانگرا پرداخته شده است. شبیه سازی های مختلف با در نظر گرفتن طیف وسیع تری از مقادیر برای قطر ستون سنگی، نسبت سطح جایگزینی A_{rr} ، محتوی فرکانسی زلزله، ضخامت لایه ماسه سست، عمق قرارگیری لایه ماسه ای سست و نفوذپذیری ستون سنگی برای توصیف کامل پاسخ لرزه ای خاک ماسه ای اشباع در حضور ستون سنگی انجام شده است. جدول ۳ مشخصات مربوط به مدل های ایجاد شده جهت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در جابجایی جانبی و همچنین فشار آب حفره ای را نشان می دهد.

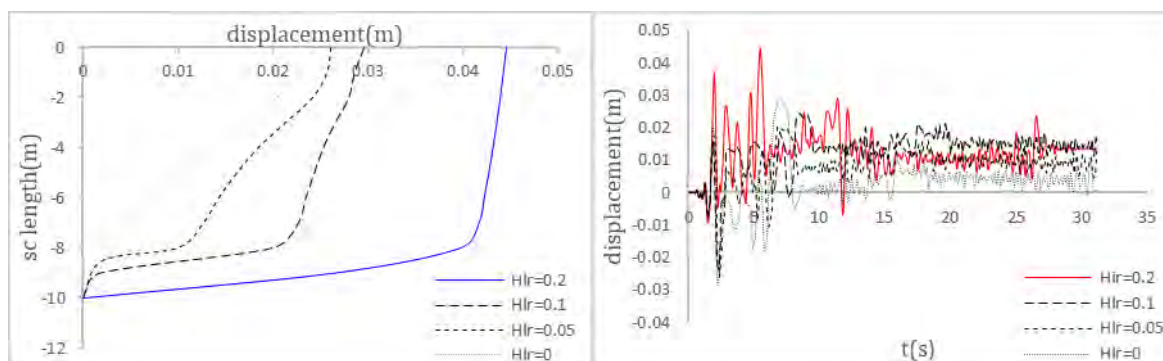
جدول ۳- مشخصات مدل ها

پارامتر	قطر (d)	A_{rr}	زلزله	H_{lr}	H_{sr}	K_{sc}
H_{lr}	0.4	0.1	Elcentro	-	0.8	0.1
H_{sr}	0.8	0.1	Elcentro	0.05	-	0.1

۴-۱. بررسی جابجایی جانبی در پارامترهای مورد مطالعه

۴-۱-۱. تاثیر H_{lr}

برای بررسی نتایج مربوط به جابجایی جانبی در مدل های ایجاد شده از H_{lr} برابر با ۰، ۰.۰۵، ۰.۱ و ۰.۲ استفاده شد. مقدار بیشینه جابجایی جانبی در جدول ۴، تاریخچه جابجایی جانبی در نمودار ۱ و جابجایی جانبی نسبت به طول ستون سنگی در نمودار ۲ برای ضخامت های مختلف ماسه سست نمایش داده شده است.



نمودار ۲

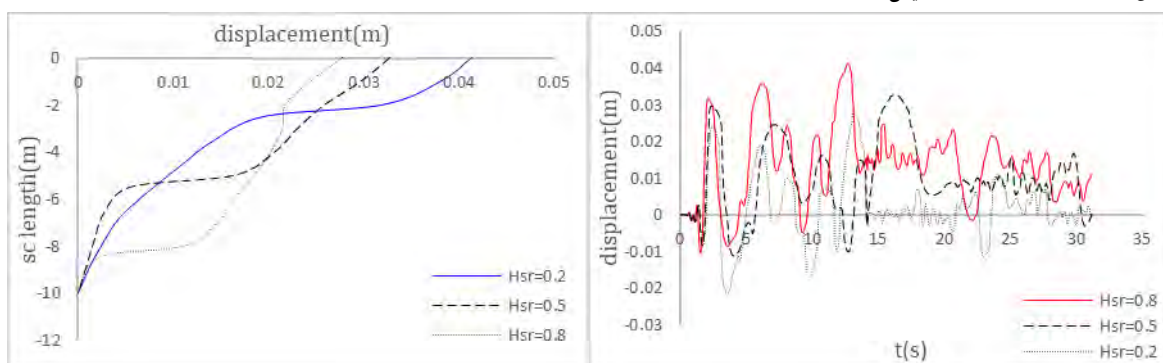
نمودار ۱

نمودار ۱- جابجایی جانبی نسبت به ضخامت های مختلف لایه ماسه سست، نمودار ۲- بیشینه جابجایی جانبی نسبت به طول ستون سنگی در ضخامت های مختلف ماسه سست

با توجه به نمودار ۱، مشاهده می‌شود که با افزایش در مقدار H_{sr} ، مقدار جابجایی جانبی افزایش پیدا خواهد کرد، این افزایش به دلیل کاهش سختی جانبی خاک به دلیل افزایش ضخامت لایه ماسه سست می‌باشد. همچنین در نمودار ۲ مشاهده می‌شود که هر چه به سطح زمین نزدیکتر می‌شویم، مقدار جابجایی جانبی نیز افزایش می‌یابد. و همچنین مشاهده می‌شود مانند مدل‌های قبلی در قسمتی که لایه خاک سست وجود دارد جابجایی جانبی مقدار بیشتری دارد.

۴-۱-۲. تاثیر H_{sr}

برای بررسی نتایج مربوط به جابجایی جانبی در مدل‌های ایجاد شده از H_{sr} های ۰.۲، ۰.۵ و ۰.۸ استفاده شد که دارای عمق‌های مختلف لایه ماسه سست بودند. مقدار بیشینه جابجایی جانبی در جدول ۴، تاریخچه جابجایی جانبی در نمودار ۳ و جابجایی جانبی نسبت به طول ستون‌سنگی در نمودار ۴ برای عمق‌های مختلف ماسه سست نمایش داده شده است.



نمودار ۴

نمودار ۳

نمودار ۳- جابجایی جانبی نسبت به H_{sr} های مختلف، نمودار ۴- بیشینه جابجایی جانبی نسبت به طول ستون‌سنگی در H_{sr} های مختلف

با توجه به نمودار ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش در مقدار H_{sr} ، که به معنی افزایش عمق استقرار لایه ماسه سست می‌باشد، مقدار جابجایی جانبی کاهش پیدا خواهد کرد، که نشان دهنده این موضوع است که هر چه لایه ماسه سست به سطح زمین نزدیکتر باشد، شاهد جابجایی جانبی بیشتر خواهیم بود. همچنین در نمودار ۴ مشاهده می‌شود که هر چه به سطح زمین نزدیکتر می‌شویم، مقدار جابجایی جانبی نیز افزایش می‌یابد و در قسمتهایی از عمق زمین که لایه خاک سست در آن وجود دارد، افزایش ناگهانی در جابجایی جانبی ایجاد گردیده است.

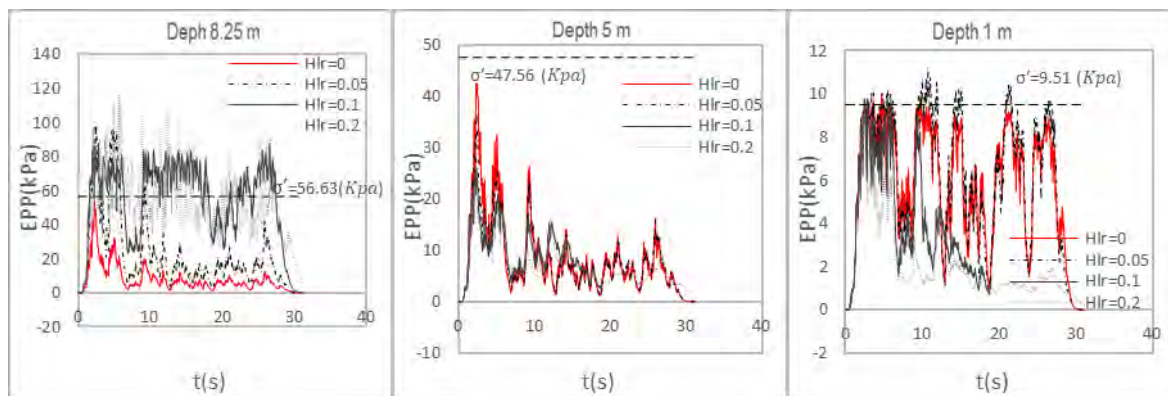
جدول ۴- بیشینه جابجایی جانبی در H_{sr} و H_{lr} (متر)

H_{sr}			H_{lr}			
۰.۸	۰.۵	۰.۲	۰.۲	۰.۱	۰.۰۵	۰
۰.۰۲۸	۰.۰۳۳	۰.۰۴۱	۰.۰۴۵	۰.۰۳	۰.۰۲۶	۰.۰۲۴

۴-۲. بررسی فشار آب حفره‌ای در پارامترهای مورد مطالعه

۴-۲-۱. تاثیر H_{lr}

با توجه به قرار گرفتن لایه خاک سست در عمق ۸ متری، عمق‌های ۵، ۱ و ۸ متری و دورترین فاصله مدل خاک از مرکز ستون‌سنگی جهت بررسی تغییرات فشار آب حفره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مقدار بیشینه فشار آب حفره‌ای در H_{lr} های مختلف در جدول ۵ و نمودار تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای بر حسب عمق پروفیل خاک H_{lr} های مختلف در نمودار ۵ نمایش داده شده است.

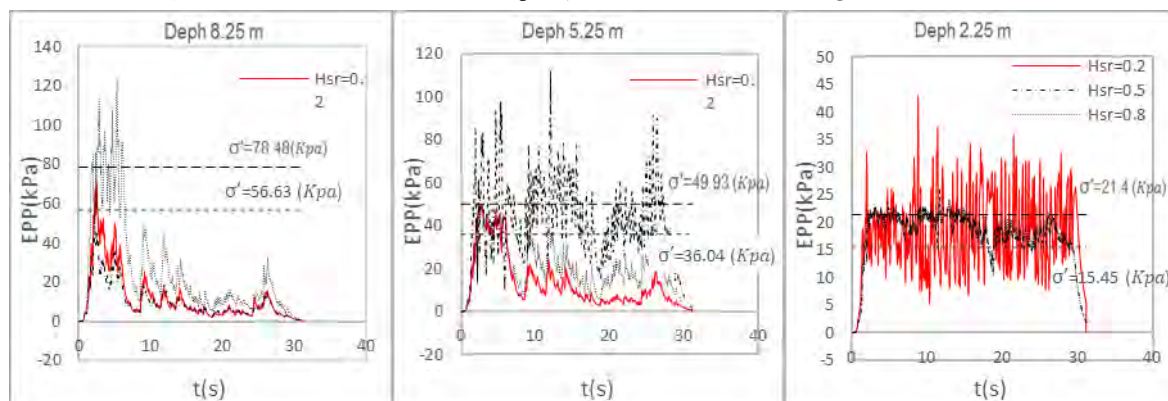


نمودار ۵- فشار آب حفره‌ای نسبت به H_{lr} های مختلف

با توجه به نمودار ۵، مشاهده می‌شود که با افزایش H_{lr} مقدار فشار آب حفره‌ای افزایش پیدا خواهد کرد، دلیل این افزایش، افزایش ضخامت لایه ماسه سست و در نتیجه آن کاهش قدرت تخلیه آب حفره‌ای خاک می‌باشد.

۴-۲-۲. تاثیر H_{sr}

به دلیل قرار گرفتن لایه خاک سست در عمق‌های ۲، ۵ و ۸ متری در سه مدل ایجاد شده برای بررسی پارامتر H_{sr} ، عمق‌های ۲، ۵، ۸ و ۸.۲۵ به عنوان مرکز لایه خاک سست جهت بررسی تغییرات مقدار فشار آب حفره‌ای مورد استفاده قرار گرفت. مقدار بیشینه فشار آب حفره‌ای H_{sr} های مختلف در جدول ۶ و نمودار تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای بر حسب عمق پروفیل خاک H_{sr} های مختلف در نمودار ۶ نمایش داده شده است.



نمودار ۶- فشار آب حفره‌ای نسبت به H_{sr} های مختلف

با توجه به نمودار ۶، مشاهده می‌شود که با افزایش H_{sr} مقدار فشار آب حفره‌ای افزایش پیدا خواهد کرد. با بررسی نمودار ۶ در عمق‌های مختلف، مشاهده می‌گردد که با وجود لایه خاک سست در هر سه عمق مورد بررسی، پدیده روانگرایی اتفاق افتاده است. علت اینکه حتی با وجود ستون‌سنگی، در عمق‌هایی که لایه خاک سست قرار داد، پدیده روانگرایی اتفاق می‌افتد به دلیل پایین بودن نفوذپذیری لایه خاک سست می‌باشد که در هنگام زلزله فرصت کافی برای تخلیه فشار آب حفره‌ای وجود ندارد.

جدول ۵- بیشینه فشار آب حفره‌ای در H_{sr} و H_{lr} (kPa)

H_{sr}			H_{lr}			
۰.۸	۰.۵	۰.۲	۰.۲	۰.۱	۰.۰۵	۰
۱۰۰	۷۱.۱	۸۱	۱۴۷	۹۸	۹۷.۷	۵۳.۷

۵. نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل مدل‌های ایجاد شده در این پژوهش، مشاهده گردید که با افزایش عمق لایه ماسه سست، مقدار جابجایی جانبی کاهش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که هر چه لایه ماسه سست به سطح زمین نزدیک‌تر باشد، جابجایی جانبی بیشتر خواهد بود. با بررسی نتایج برای ضخامت لایه ماسه سست H_{lr} مشاهده می‌گردد که با افزایش ضخامت لایه ماسه سست، مقدار بیشینه جابجایی جانبی افزایش می‌یابد. این افزایش جابجایی جانبی می‌تواند به دلیل کم بودن سختی خاک سست و همچنین پایین بودن نفوذپذیری آن باشد. نمودارهای جابجایی جانبی در عمق‌های مختلف خاک نشان می‌دهند در قسمت‌هایی که لایه ماسه سست قرار دارد، تغییر ناگهانی در مقدار جابجایی جانبی دیده می‌شود، که این نشان دهنده تاثیر منفی وجود یک لایه سست در پروفیل خاک برای مقاومت در برابر زلزله می‌باشد. در نمودارهای مربوط به جابجایی جانبی و فشار آب حفره‌ای، به ویژه در عمق مرکز لایه خاک سست مشاهده می‌گردد که وجود یک لایه خاک سست در پروفیل خاک، حتی در صورت احداث ستون سنگی، تاثیر مستقیم بر افزایش فشار آب حفره‌ای، و در نتیجه آن افزایش مقدار جابجایی جانبی دارد.

بررسی نتایج مربوط به فشار آب حفره‌ای در ضخامت‌های مختلف لایه خاک سست نشان می‌دهد با افزایش ضخامت لایه خاک سست، مقدار فشار آب حفره‌ای نیز افزایش خواهد داشت. نتایج مربوط به فشار آب حفره‌ای در موقعیت‌های مختلف خاک سست نشان می‌دهد که قرار گرفتن لایه خاک سست در قسمت بالا و پایین مدل تاثیر بیشتری بر افزایش فشار آب حفره‌ای خواهد داشت.

با بررسی نتایج همه مدل‌های ایجاد شده مشاهده می‌گردد که تقریباً رابطه مستقیمی بین فشار آب حفره‌ای و جابجایی جانبی وجود دارد. با توجه به اینکه تاثیر ستون سنگی در کاهش فشار آب حفره‌ای در مدل‌های ایجاد شده به اثبات رسیده است، برای کاهش مقدار جابجایی جانبی، احداث ستون سنگی تاثیرگذار خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که وجود لایه خاک سست، تا حدودی تاثیر ستون سنگی را در کاهش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه آن کاهش جابجایی جانبی را کاهش خواهد داد. همانطور که ملاحظه گردید، در بعضی از مدل‌ها با وجود ستون سنگی، پدیده روانگرایی ایجاد گردیده است.

در انتها متذکر می‌گردد علت انتخاب زلزله‌های لوما پریتا و السنترو این است که در ایران و در زلزله‌هایی که پدیده روانگرایی اتفاق افتاده است، به دلیل فقدان شتاب‌نگاشت‌های پیشرفته، داده‌های کافی جهت شبیه‌سازی این زلزله‌ها در دسترس نمی‌باشد و همچنین زلزله‌ای لوما پریتا و السنترو زلزله‌هایی هستند که در اکثر تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین نتایج این زلزله‌ها را می‌توان به زلزله‌های دیگر بسط داد. شاید این زلزله‌ها از لحاظ کمی کافی نباشند، ولی از لحاظ کیفی می‌توانند انتظارات ما را برآورده کنند.

۶. منابع

[1] Casagrande, A. (1936). "Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills." J. Boston Society of Civil Engineers 23(1): 13-32.

[2] Martin, J. B., et al. (1992). Quantitative evaluation of stone column techniques for earthquake liquefaction mitigation. Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering: 19-24 July 1992, Madrid, Spain, CRC Press.



دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۸ و ۷ خرداد ۱۳۹۹

دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران



- [3] Dobry, R. and L. Liu (1992). Centrifuge modeling of soil liquefaction. Proc., 10th World Conf. on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering (IAEE) Madrid, Spain.
- [4] Asgari, A., et al. (2013). "Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 51: 77-96.
- [5] Huang, C., et al. (2016). "Mitigation of soil liquefaction using stone columns: an experimental investigation." *Marine Georesources & Geotechnology* 34(3): 244-251.
- [6] Olarte, J., et al. (2017). "Centrifuge modeling of mitigation-soil-foundation-structure interaction on liquefiable ground." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 97: 304-323.
- [7] Noui, A., et al. (2018). "Numerical investigation of dynamic behavior of foundation reinforced by stone columns using Finn model: Liquefaction mitigation."
- [8] Lu, J., et al. (2019). "Using Stone Columns to Mitigate Lateral Deformation in Uniform and Stratified Liquefiable Soil Strata." *International Journal of Geomechanics* 19(5): 04019026.
- [9] McKenna, F. and G. L. Fenves (2008). "Using the OpenSees interpreter on parallel computers." *Network for earthquake engineering simulations*.
- [10] Elgamal, A., et al. (2009). "Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 135(11): 1672-1682.
- [11] Parra-Colmenares, E. J. (1997). "Numerical modeling of liquefaction and lateral ground deformation including cyclic mobility and dilation response in soil systems."
- [12] Yang, Z. and A. Elgamal (2002). "Influence of permeability on liquefaction-induced shear deformation." *Journal of Engineering Mechanics* 128(7): 720-729.
- [13] Biot, M. A. (1962). "Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media." *Journal of applied physics* 33(4): 1482-1498.