

تحلیل عددی رفتار زمین مسلح شده با گروه ستون سنگی

سعیده تبرساز،^۱ عباس سروش^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

soroush@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۸)

چکیده- در مقاله حاضر تحلیل عددی گروه ستون سنگی^۱ با طول ده متر ارائه شده که در لایه ای رسی ساخته شده‌اند. بارگذاری توسط پی صلب انجام شده است. گروه ستون‌های سنگی شامل پنج ستون سنگی می شود که هندسه خاک و ستون‌ها متقارن است. تحلیل‌های عددی انجام شده به صورت دوبعدی و کرنش صفحه‌ای است. رفتار مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن با مدل رفتاری الاستوپلاستیک مور-کولمب مدل سازی شده است. در تحلیل‌های انجام شده اثر پارامترهای مختلف مانند تعداد ستون‌ها، فاصله ستون‌ها از یکدیگر، طول ستون‌ها، نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک اطراف، اندازه پی و ضریب پواسون مصالح ستون و خاک مطالعه شده اند.

نتایج نشان می‌دهند که شکم دادگی ستون که به گسیختگی آن منجر می‌شود، در قسمت‌های بالایی ستون (بین دو تا چهار برابر قطر ستون از سر ستون) اتفاق می‌افتد. شکم دادگی در ستون‌های داخلی در بخش‌های پایین‌تری نسبت به ستون‌های کناری اتفاق می‌افتد. مهمترین نتیجه به‌دست آمده این است که گروه ستون سنگی می‌تواند شامل ستون‌هایی با طول غیر یکسان باشند که ضمن صرفه اقتصادی، هدف از ساخت ستون‌های سنگی را در کاهش نشست تأمین کنند.

کلید واژگان: ستون‌های سنگی، خاک سست، تحلیل عددی، بهسازی خاک

۱- مقدمه

ساخت ستون‌های سنگی به عنوان روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست، توانایی بهسازی زمین‌های متشکل از خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده سست را دارند. این روش سال‌هاست به منظور کاهش نشست، افزایش ظرفیت باربری، کاهش پتانسیل روانگرایی و افزایش سرعت تحکیم زمین‌های سست به کار می‌رود.

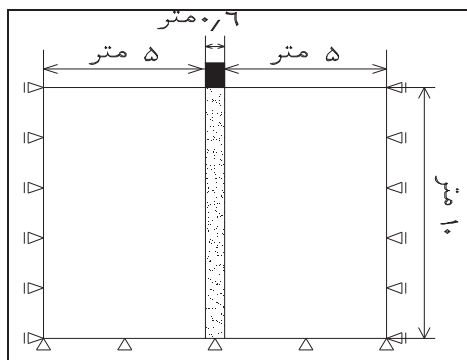
ستون‌های سنگی نخستین بار در سال ۱۸۳۰ در فرانسه و از سال ۱۹۵۰ به طور گسترده‌ای در کشورهای دیگر استفاده شده است [۱]. در ایران این روش برای نخستین بار با استفاده از روش کوبیدنی^۱ اجرا و از سال ۱۳۸۳ تکنیک‌های ارتعاشی ساخت ستون‌های سنگی به ایران وارد شد.

بررسی رفتار ستون‌های سنگی اولین بار در سال ۱۹۷۴ انجام شد [۲]. آزمون‌های آزمایشگاهی نشان دادند که ستون سنگی منفرد بر اثر شکم‌دادگی در بخش بالایی آن گسیخته می‌شود. بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی تک ستون سنگی، این نتیجه حاصل شد که هر ستون سنگی در گروه ستون سنگی نیز می‌تواند مستقل از ستون‌های مجاور خود تغییر شکل داده و گسیخته شود، به بیان دیگر در این روش اثر ستون‌ها بر یکدیگر در نظر گرفته نمی‌شود [۲]. این مسأله همان مفهوم روش سلول واحد می‌باشد که در سالیانی طولانی مبنای تحلیل و طراحی ستون‌های سنگی بوده است [۳-۷]. مطالعات مختلف آزمایشگاهی [۸] تا [۱۱] و عددی [۶]، [۷]، [۱۲] بعدی، نشان داد که تحلیل و طراحی گروه ستون سنگی بدون در نظر گرفتن اثر ستون‌های مجاور بر هم، صحیح نیست.

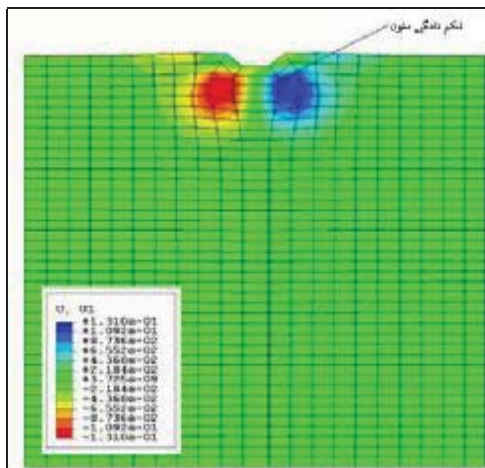
در مقاله حاضر به بررسی عددی اثر گروه و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند تعداد ستون‌ها، فاصله ستون‌ها، طول ستون‌ها، نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک اطراف آن، عرض پی نسبت به عرض ستون و ضریب پواسن مصالح ستون و خاک بر نشست زمین مسلح شده با ستون‌های سنگی می‌پردازیم. تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 5.1-6 و به صورت کرنش صفحه‌ای انجام شده است.

۲- ستون سنگی منفرد

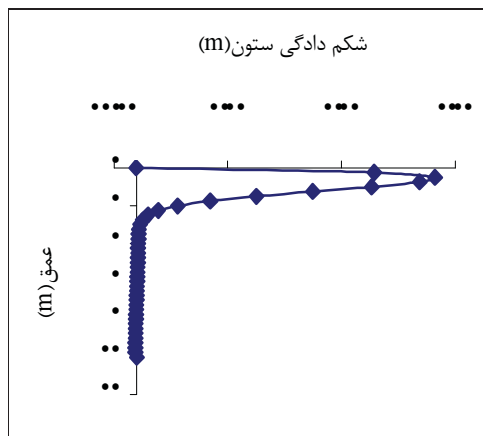
نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی [۱۳]، [۱۴] نشان داده که ستون سنگی منفرد بلند-چه به صورت اتکایی و چه به صورت شناور- بر اثر شکم‌دادگی در بخش بالایی آن گسیخته می‌شود. به منظور ارزیابی رفتار ستون سنگی منفرد، تحلیل عددی برای زمین رسی مسلح شده با ستون سنگی اتکایی به قطر ۰/۶ متر انجام می‌شود. بارگذاری توسط پی صلب و فقط روی ستون سنگی انجام شده است. مدل سازی ستون سنگی و خاک اطراف آن به صورت کرنش صفحه‌ای بوده و کل هندسه مدل در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱ هندسه ستون سنگی و خاک اطراف آن



شکل ۲ تغییر شکل جانبی ستون سنگی منفرد در تحلیل عددی



شکل ۳ میزان شکم دادگی در طول ستون

۳- گروه ستون سنگی

از بیش از ۳۰ سال پیش فرض می‌شده که رفتار هر ستون در داخل گروه ستون سنگی مستقل از ستون‌های مجاور بوده و هر ستون مانند ستونی منفرد تغییر شکل می‌دهد. این فرض در واقع همان مفهوم سلول واحد است. شکل (۴) تغییر شکل هر ستون سنگی را در گروه با توجه به این فرض نشان می‌دهد.

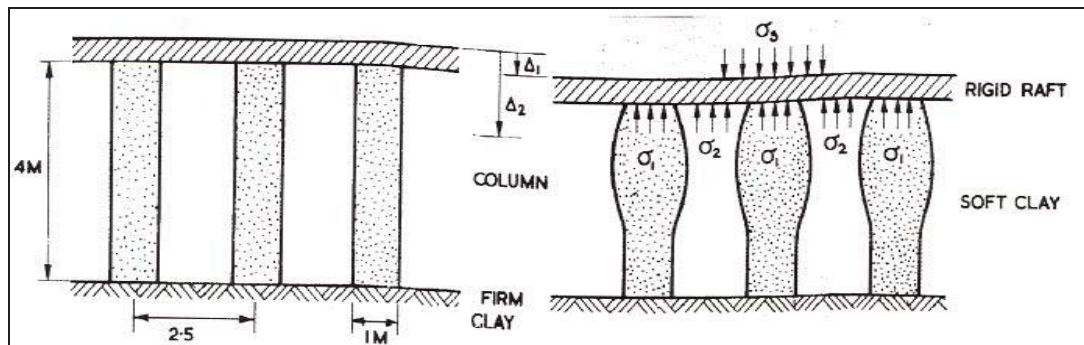
مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن، با استفاده از مدل رفتاری الاستوپلاستیک مور-کولمب و با فرض قانون جریان ناهمبسته ($\phi \neq \psi$) مدل سازی شده است. استفاده از قانون جریان ناهمبسته، تغییر شکل‌های واقعی‌تری را نتیجه می‌دهد [۱۵]. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح ستون و خاک اطراف آن در جدول (۱) ارائه شده است. بار ۵۸۵ کیلو پاسکال توسط پی صلب در ۱۰۰ مرحله و فقط روی ستون سنگی وارد شده است.

شکل (۲) تغییر شکل ستون سنگی منفرد را پس از اعمال کل بار نشان می‌دهد. مقدار بار فوق با سعی و خطا به گونه‌ای انتخاب شده که ضمن ایجاد نشست قابل توجه در ستون، موجب گسیختگی آن نشود. شکم دادگی ایجاد شده در قسمت‌های فوقانی ستون سنگی در شکل (۲) به خوبی مشخص است. شکل (۳) نشان‌دهنده میزان شکم دادگی در طول ستون است. موقعیت کلی شکم دادگی با یافته‌های هافر و ویترز^۱ در سال ۱۹۷۴ سازگار است؛ آنها نشان دادند که این شکم دادگی تا عمق حدوداً چهار برابر قطر ستون از سر ستون اتفاق می‌افتد.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح ستون و خاک

رس	مصالح ستون سنگی	
۱۸	۲۰	$\gamma (kN/m^3)$
۱۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	$E (kPa)$
۰/۴۵	۰/۳۵	ν
۱۰	۴۰	ϕ°
۰	۱۰	ψ°
۵	۰	$c (kPa)$

1. Hughes & Withers



شکل ۴ تغییر شکل ستون‌های سنگی بدون در نظر گرفتن اثر گروه [۲]

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب تغییر شکل ستون‌های سنگی را در آزمایش TS17 و تغییر شکل ستون‌های سنگی را در تحلیل عددی را نشان می‌دهد. شکل (۷) نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل عددی را مقایسه می‌کند. این شکل تغییرات نسبت بار اعمال شده به مقاومت زهکشی نشده خاک رسی (q/c_u) را در مقابل نسبت نشست ستون به قطر آن (Δ/d) نشان می‌دهد.

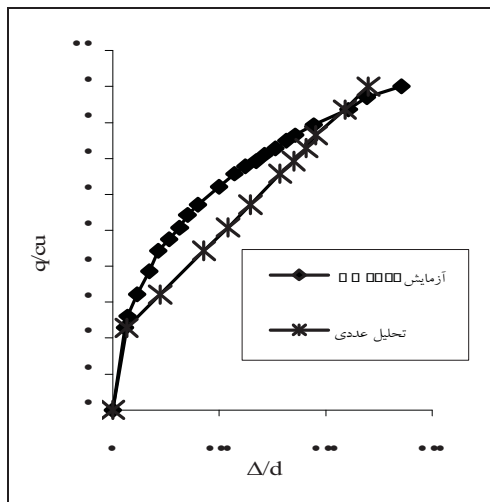
جدول ۲ مشخصات آزمایش TS17 انجام شده توسط هو و همکاران در سال ۲۰۰۰

رس	مصلح ستون سنگی	
۱۴	--	$c_u (kPa)$
۱۵۰	۵/۵	$r (mm)$
۳۰۰	۱۶۰	$L (mm)$
--	۱۹/۸	$S (mm)$
--	۲۴	$A_s (\%)$
۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	$\kappa (kPa)$
۵۰۰۰	۵۰۰۰۰	$G (kPa)$
۲۳	۳۰	$\phi'^{(\circ)}$

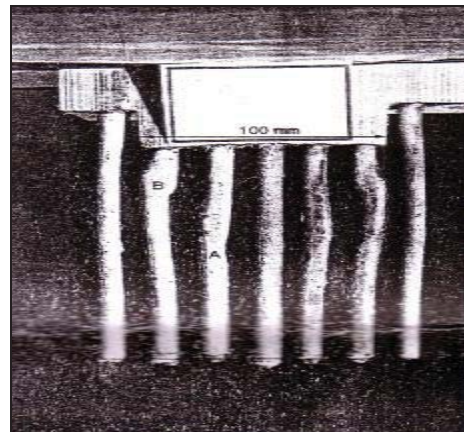
نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی هو و همکاران^۱ در سال ۱۹۹۷ نشان داد که اثر ستون‌های مجاور در هر گروه ستون سنگی [۹]، به وضوح وجود دارد. آنان مشاهده کردند که با اعمال بار به هر گروه ستون سنگی، هر ستون فشاری را به ستون‌های مجاور خود اعمال می‌کند که مانع از ایجاد شکم‌دادگی در بخش‌های بالایی آنها می‌شود، در عوض شکم‌دادگی در بخش‌های پایین‌تر آن ستون‌ها اتفاق می‌افتد. در ستون‌های کناری که محصور شدگی ناشی از وجود ستون‌های مجاور در یک طرف آنها وجود ندارند، شکم‌دادگی در بخش بالایی ستون اتفاق می‌افتد.

در این مقاله یکی از آزمایش‌های انجام شده توسط هو و همکاران در سال ۲۰۰۰ [آزمایش TS17] تحلیل عددی شده و نتایج آن با نتایج آزمایش مقایسه شده است. جدول (۲) مشخصات آزمایش TS17 را ارائه می‌دهد. با توجه به مدل‌سازی هندسه سه بعدی آزمایش به صورت کرنش صفحه‌ای، به منظور ایجاد شرایط واقعی‌تر، از مساحت جایگزینی شعاعی A_r به جای مساحت جایگزینی A_s استفاده شده است [۱۰]. همچنین به دلیل اینکه در مدل‌سازی عددی شرایط زهکشی نشده وجود دارد، زاویه اصطکاک داخلی رس برابر صفر در نظر گرفته شده است.

1. Hu et al.



شکل ۷ مقایسه نتایج حاصل از آزمایش TS17 و تحلیل عددی

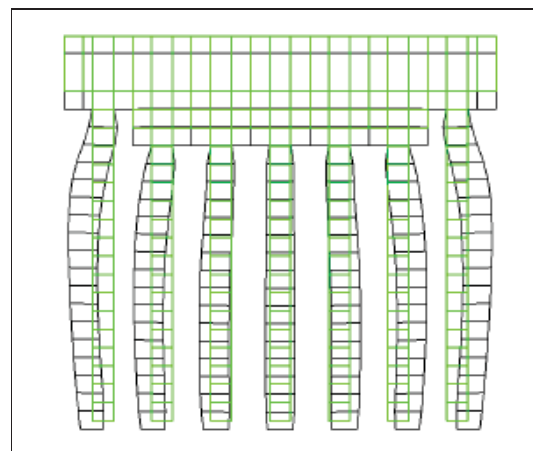


شکل ۵ تغییر شکل ستون‌ها پس از اعمال بار (هو و همکاران ۲۰۰۰)

جدول ۳ دامنه تغییرات پارامترهای مورد استفاده در تحلیل‌های عددی

پارامتر	دامنه تغییرات
مدول الاستیسیته رس (E_C)	۱/۶ تا ۱۰ مگاپاسکال
مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی (E_S)	۲۵ تا ۱۲۵ مگاپاسکال
ضریب پواسن رس (ν_C)	۰/۳ تا ۰/۴۵
ضریب پواسن مصالح ستون سنگی (ν_S)	۰/۲ تا ۰/۳۵
فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی (S)	۱/۲ تا ۳/۵ متر
قطر ستون سنگی (d)	۰/۶ تا ۱ متر
طول ستون سنگی (L)	۲ متر تا ۱۰ متر
عرض پی (D)	۰/۶ متر تا ۲/۶ متر

مشخصات هندسی گروه ستون در شکل (۸) و مشخصات مکانیکی مصالح در جدول (۴) ارائه شده است. بارگذاری توسط پی صلب و به صورت زهکشی نشده است. در هر



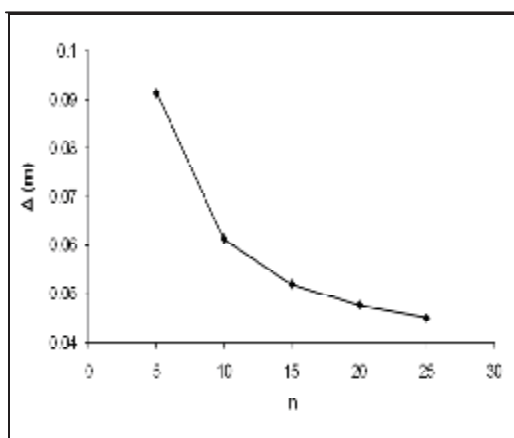
شکل ۶ تغییر شکل آزمایش TS17 حاصل از تحلیل عددی

۳-۱- تحلیل حساسیت

به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف مانند تعداد ستونها، فاصله ستونها، نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک، ضریب پواسن مصالح ستون سنگی و خاک و طول ستون بر رفتار زمین مسلح شده با گروه ستون سنگی، تحلیل‌های عددی برای شرایط متفاوت خاک و ستون سنگی انجام شده است. جدول (۳) دامنه تغییرات پارامترها را نشان می‌دهد.

نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته رس

شکل (۹) تأثیر تغییر نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته رس (n) را با فرض اینکه مدول الاستیسیته رس ثابت و برابر ۵ مگاپاسکال باشد، به ازای بار ۱۶۵ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که طبق انتظار افزایش نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته رس باعث کاهش نشست زمین مسلح شده با ستون سنگی می‌شود.

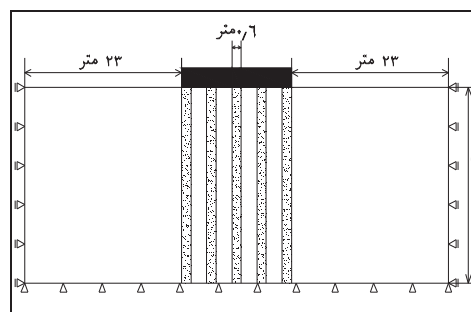


شکل ۹ تغییرات نشست گروه ستون بر حسب تغییر n (مدول الاستیسیته رس = ۵ مگاپاسکال)

فاصله ستون‌ها

شکل (۱۰) اثر تغییر فاصله ستون‌ها را از ۱/۲ متر تا ۳/۶ متر بر نشست ستون‌ها به ازای بار ۲۲۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. طبق انتظار، افزایش فاصله ستون‌ها، به کاهش محصورشدگی ناشی از حضور ستون‌های مجاور منجر شده و در نتیجه نشست سر ستون‌ها افزایش یافته است.

مرحله از تحلیل‌ها، بار اعمال شده بر اساس ظرفیت باربری ضعیف‌ترین حالت زمین مسلح شده با ستون‌های سنگی انتخاب شده است.



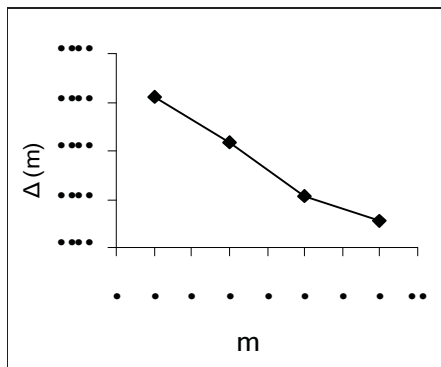
شکل ۸ مشخصات هندسی زمین مسلح شده با ستون‌های سنگی

جدول ۴ مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح گروه ستون سنگی و خاک اطراف آن

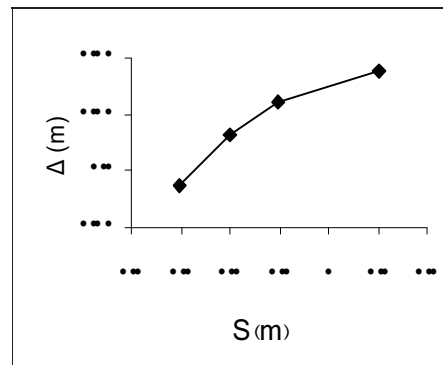
رس	مصالح ستون سنگی	
۱۸	۲۰	$\gamma (kN/m^3)$
۱۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	$E (kPa)$
۰/۴۵	۰/۳۵	ν
۱۰	۴۰	ϕ°
۰	۱۰	ψ°
۵	۰	$c (kPa)$

۳-۱-۱- نتایج

به ازای تغییر پارامترهای مختلف، میزان نشست سر ستون‌های سنگی مطالعه شده است. با توجه به صلب بودن پی، نشست سر تمامی ستون‌ها با یکدیگر برابر است.



شکل ۱۱ تغییرات نشست گروه ستون با تغییر تعداد ستونها



شکل ۱۰ تغییرات نشست گروه ستون نسبت به فاصله مرکز به مرکز ستونها

جدول ۵ مقایسه مقادیر بار متمرکز و نشست گروه ستونهای سنگی با تعداد ستون متغیر

تعداد ستون	نشست (m)	بار متمرکز (kN)
۳	۰/۲۷۴	۹۷۵
۵	۰/۲۳۰	۱۷۵۵
۷	۰/۱۷۳	۲۵۳۵
۹	۰/۱۴۷	۳۳۷۵

نسبت ضرایب پواسن

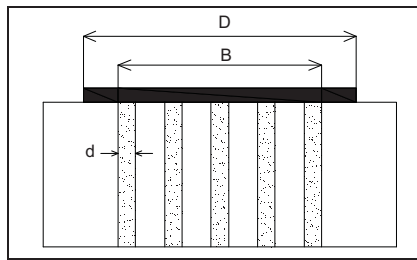
ضریب پواسن مصالح ستون سنگی و خاک نیز از جمله عوامل مؤثر در نشست زمینهای مسلح شده با ستونهای سنگی می باشد. شکل (۱۲) اثر تغییر ضریب پواسن مصالح ستون سنگی و خاک را به ازای بار ۲۸۰ کیلوپاسکال نشان می دهد. ضریب پواسن مصالح ستون سنگی از ۰/۲ تا ۰/۳۵ (به ازای ضریب پواسن رس برابر با ۰/۴۵) و ضریب پواسن خاک از ۰/۳ تا ۰/۴۵ (به ازای ضریب پواسن مصالح ستون سنگی برابر با ۰/۳۵) تغییر می کند. در این شکل مشاهده می شود که افزایش ضریب پواسن خاک و مصالح ستون (با فرض ثابت بودن ضریب پواسن مصالح دیگر) باعث کاهش نشست ستونها می شود. مطابق شکل (۱۲)، افزایش ضریب پواسن مصالح

تعداد ستونها

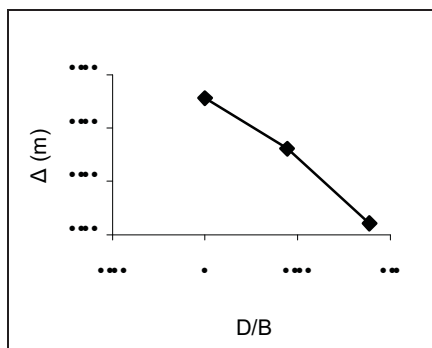
تغییرات نشست سر ستونها با تغییر تعداد ستونهای سنگی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. افزایش تعداد ستونها منجر به محصورشدگی بیشتر ستونهای میانی شده و در نتیجه نشست کاهش می یابد. تحلیل های عددی به ازای ۳، ۵، ۷ و ۹ ستون سنگی اتکایی به قطر ۰/۶ متر و طول ۱۰ متر انجام شده است. فشار اعمال شده در هر مورد یکسان و برابر ۳۲۵ کیلوپاسکال می باشد، ولی با افزایش تعداد ستونها نیروی اعمال شده، به علت افزایش بعد پی، افزایش یافته است. نیروی اعمال شده و نشست حاصل از آن برای هر مورد در جدول (۵) ارائه شده است. کاهش نشست با افزایش تعداد ستونهای سنگی به خوبی از نتایج تحلیل های عددی رسم شده در شکل (۱۱) نیز مشخص می باشد.

با توجه به جدول (۵) ملاحظه می شود با افزایش تعداد ستونها، نیروی اعمال شده افزایش می یابد، ولی نشست به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

سنگی، در مقایسه با افزایش ضریب پواسن خاک اطراف آن، تأثیر اندکی در کاهش نشست زمین مسلح شده دارد.



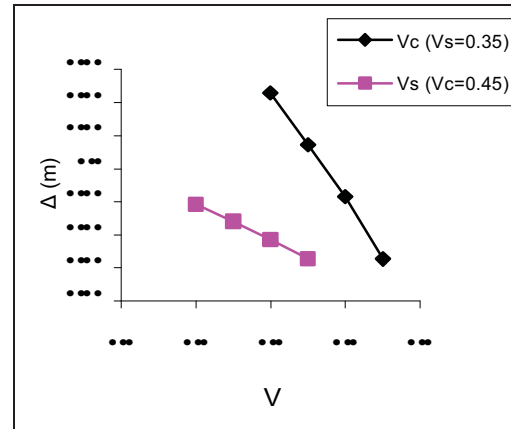
شکل ۱۳ معرفی پارامترهای مورد استفاده در تحلیل اثرهای ناشی از تغییر بعد پی



شکل ۱۴ تغییرات نشست گروه ستون با تغییر بعد پی
($d = 0.6m$)

طول ستون‌ها

شکل ۱۵ تأثیر طول ستون‌ها را به ازای بار ۱۷۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. در این تحلیل‌ها طول ستون‌ها به صورت یکنواخت از ۲ تا ۱۰ متر تغییر می‌کند، یعنی در هر تحلیل طول تمامی ستون‌ها یکسان است. تحلیل‌ها بر روی گروه ستون سنگی با پنج ستون با قطر ۰/۶ متر و فاصله مرکز به مرکز ۱/۲ متر انجام شده است. تمامی ستون‌ها غیر از ستون‌های با طول ۱۰ متر از نوع شناورند. بر طبق انتظار، نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که افزایش طول ستون‌ها به کاهش نشست سر و انتهای ستون منجر می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که نرخ کاهش



شکل ۱۲ تغییرات نشست گروه ستون با تغییر ضریب پواسن مصالح ستون و خاک

عرض پی

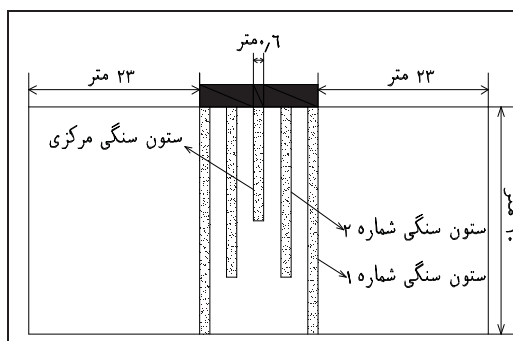
عامل دیگری که ممکن است بر میزان نشست زمین مسلح شده با ستون‌های سنگی مؤثر باشد، عرض پی است. هندسه مورد استفاده در تحلیل عددی، در شکل (۱۳) معرفی شده است. شکل (۱۴) نتایج تحلیل‌های عددی را به ازای بار ۲۶۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. هرچند فشار ثابت بوده و نیروی اعمالی به علت افزایش اندازه پی، افزایش یافته، اما نتایج، کاهش نشست را به ازای افزایش نسبت D/B نشان می‌دهد. افزایش اندازه پی باعث می‌شود که قسمتی از بار اعمال شده، توسط خاک اطراف ستون‌های کناری تحمل شود. در نتیجه تنش‌های خاک افزایش می‌یابد. این منجر به افزایش تنش‌های محصورکنندگی ستون‌ها و کاهش شکم‌دادگی و نشست ستون‌های سنگی می‌شود. همچنین حداکثر شکم‌دادگی در عمق پایین‌تری از سر ستون‌ها اتفاق می‌افتد.

(۰/۲۳۰ متر) مشاهده می‌شود که می‌توان گروه ستون با طول متغیر (ستون‌های میانی کوتاه‌تر) به گونه‌ای اجرا کرد که ضمن کاربرد مصالح کمتر (طول کمتر مجموع ستون‌ها)، نشست را نیز کنترل نمود.

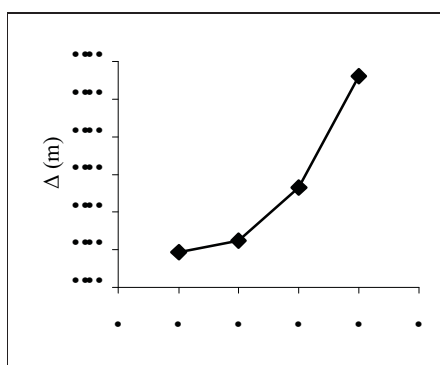
جدول ۶ معرفی گروه و مشخصات طولی ستون‌های سنگی با

طول‌های نامساوی

شماره گروه	طول ستون شماره یک (متر)	طول ستون شماره دو (متر)	طول ستون مرکزی (متر)
۱	۱۰	۱۰	۱۰
۲	۱۰	۹	۸
۳	۱۰	۸	۷
۴	۱۰	۷	۶

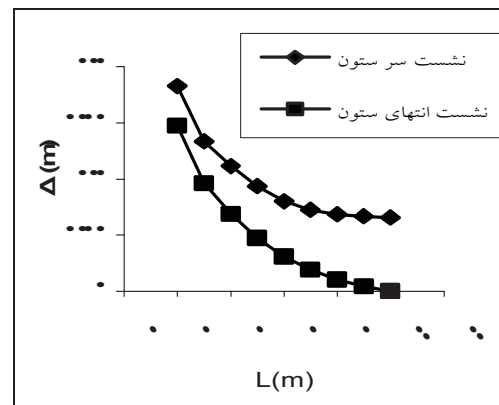


شکل ۱۶ نمایش گروه ستون سنگی با طول نامساوی



شکل ۱۷ تغییرات نشست گروه ستون در گروه‌های

نشست با افزایش طول ستونها از ۶ تا ۱۰ متر کاهش یافته است.



شکل ۱۵ تغییرات نشست سر و انتهای گروه ستون با تغییر طول ستون‌ها

طول نامساوی ستون‌ها در گروه

نتایج تحلیل‌های عددی حاکی از آن است که میزان شکم‌دادگی ستون‌های میانی کمتر از ستون‌های کناری می‌باشد و با توجه به اینکه شکم‌دادگی ستون‌ها معیاری از انتقال بار وارده می‌باشد، این مسأله می‌تواند منجر به طرح ایده گروه ستون سنگی با طول‌های متغیر شود، به گونه‌ای که طول ستون‌های داخلی کمتر از ستون‌های میانی باشد (شکل ۱۶). ستون‌های سنگی با طول متغیر می‌توانند از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه باشند. به منظور ارزیابی این ایده، تحلیل‌های عددی بر روی سه گروه ستون سنگی با طول‌های نامساوی که مشخصات هندسی آن در جدول (۶) ارائه شده، انجام گرفته است. کلیه مشخصات مکانیکی مصالح ستون‌ها و خاک طبق جدول ۴ می‌باشد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، به صورت نشست ستون‌ها در مقابل نوع گروه ستون (طبق جدول ۶) در شکل (۱۷) نشان داده شده است. از مقایسه نشست ستون‌ها در گروه ۲ (۰/۲۳۳ متر) با نشست آنها در گروه ۱ [گروه اصلی]

۴- نتیجه گیری

اقتصادی، هدف از ساخت ستون‌های سنگی را در کاهش نشست زمین تأمین کرد.

۵- منابع

- [1] Etezad, M., Hanna, A. M. and Ayadat, T., "Numerical model for group of stone columns", *Proc. 73rd Annual Meeting of ICOLD*, Tehran, Iran 2005; paper No. 097-OT.
- [2] Hughes, J. M. O. and Withers, N. J., "Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns", *Ground Engineering*, vol 1, No. 3, 1974, pp 42-49.
- [3] Balaam, N. P., Brown, P. T. and Poulos, H. G., "Settlement Analysis of Soft Clays Reinforced with Granular Piles", *proceedings of 5th international conference on soil engineering*, Bangkok, Thailand 1977; pp 81-92.
- [4] Balaam N. P. and Booker J. R., "Analysis of rigid rafts supported by granular piles", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.5, 1981, pp 379-403.
- [5] Balaam N. P. and Booker J. R., "Effects of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.9, 1985, pp 331-351.
- [6] Guetif Fessi, Z. and Bouassida, M., "Settlement estimation of soils reinforced by columns using a poroelastic model", *Proc. 16th ICSMGE*, Japan 2005; pp 1355-1358.
- [7] Tan, S.A. and Khine Khine, Oo., "Finite element modeling of stone column- a case history", *Proc. 16th ICSMGE*, Japan 2005; pp 1355-1358.
- [8] Hu, W., "Physical modeling of group behavior of stone column foundations.", *Ph.D. Dissertation*, University of Glasgow; 1995.
- [9] Hu, W., Wood, D.M. and Stewart, W., "Ground improvement using stone column foundations: result of model tests", *Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, 1997, pp.247-256.
- [10] Mckelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. and Graham, J., "Modeling vibrated stone columns

نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که شکم‌دادگی ستون که به گسیختگی آن منجر می‌شود در قسمت‌های بالایی ستون (در فاصله ۲ تا ۴ برابر قطر ستون از سر ستون) اتفاق می‌افتد. شکم‌دادگی در ستون‌های داخلی در بخش‌های پایین‌تری نسبت به ستون‌های کناری اتفاق می‌افتد.

افزایش نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی به مدول الاستیسیته خاک اطراف (در صورتی که مدول الاستیسیته خاک ثابت باشد)، افزایش قطر ستون، افزایش طول ستون و افزایش بعد پی، برخی از عوامل مؤثر در کاهش نشست زمین‌های مسلح شده با گروه ستون سنگی است. افزایش طول ستون منجر به کاهش نشست سر و انتهای ستون می‌شود و افزایش بعد پی باعث می‌شود که قسمتی از بار اعمال شده، توسط خاک اطراف ستون‌های کناری تحمل شود، در نتیجه تنش‌های خاک افزایش می‌یابد. این مسأله به افزایش تنش‌های محصورکنندگی ستون‌ها و کاهش شکم‌دادگی و نشست ستون‌های سنگی منجر می‌شود. کاهش فاصله ستون‌ها تا حد ممکن باعث افزایش محصورشدگی ناشی از حضور ستون‌های مجاور شده و افزایش تعداد ستون‌های سنگی، به محصورشدگی بیشتر ستون‌های میانی منجر شده و در نتیجه نشست کاهش می‌یابد. ضریب پواسن خاک و مصالح ستون سنگی نیز برخی از عوامل مؤثر بر میزان نشست زمین‌های مسلح شده با ستون‌های سنگی است، هرچند تأثیر ضریب پواسن مصالح ستون سنگی اندک است.

در بررسی اثر طول ستون‌های سنگی، نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که می‌توان با ایجاد گروه ستون‌های سنگی با طول‌های نابرابر، علاوه بر صرفه‌جویی

L = طول ستون ρ = جرم مخصوص φ = زاویه اصطکاک داخلی φ' = زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده ψ = زاویه اتساع c = چسبندگی c_u = مقاومت زهکشی نشده r = شعاع ستون سنگی و مخزن استوانه‌ای آزمایش S = فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها $A_s = \pi(r_s/S)^2$ = مساحت جایگزینی $A_r = 2(r_s/S)$ = مساحت جایگزینی شعاعی κ = مدول بالک G = مدول برشی q = بار پی Δ = نشست m = تعداد ستون‌های سنگی n = نسبت مدول الاستیسیته مصالح ستون به مدول

الاستیسیته خاک

in soft clay", *J. Geotech. Engng. ASCE*, 2004, Vol.157, pp 137-149.[11] Wood, D., Hu, W. and Nash, D. F. T., "Group effects in stone column foundations: model tests", *Geotechnique*, Vol.50, No.6, 2000, pp 689-698.[12] Clemente, L. M., Senapathy, H. and Davie, J. R., "Performance prediction of stone column supported foundations", *Proc. 16th ICSMGE*, Japan 2005; pp 1327-1330.[13] Hughes, J. M. O., Withers, N. J. and Greenwood, D. A., "A Field Trial of Reinforcing Effects of Stone Columns in Soil", *Geotechnique*, Vol.25, No.1, 1975, pp 61-69[14] Maurya, R. R., Sharma, B. V. R. and Naresh, D. N., "Footing load tests on single and group of stone columns", *Proc. 16th ICSMGE*, Japan 2005; pp 1385-1388.[15] Desai, C. S. and Siriwardane, H.J., *Constitutive laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials*, 1984.

۶- نشانه‌ها

 E = مدول الاستیسیته ν = ضریب پواسن D = عرض پی d = قطر ستون سنگی