

(مقاله پژوهشی)

شبیه‌سازی عددی تأثیر دانه‌بندی و شرایط مرزی بر رفتار ستون‌های سنگی تقویت‌کننده خاک با استفاده از روش اجزای مجزا

حامد بایسته*^۱، کامران هوشیار^۱

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
(دریافت: خرداد ۱۴۰۰، پذیرش: آبان ۱۴۰۰)

چکیده

یکی از روش‌های مؤثر بهسازی خاک روش ستون سنگی است. در این روش خاک مسئله‌دار با ستون‌هایی از جنس مصالح شنی جایگزین می‌شود و منتج به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری و افزایش توان زهکشی خاک می‌گردد. یکی از عوامل مهم باربری ستون‌های سنگی، کیفیت محصورشدگی آن‌ها در خاک است. در خاک‌های سست فشار جانبی اعمالی به ستون کافی نبوده و ستون سنگی تحت اثر بارهای اعمالی دچار کماتش جانبی می‌شود. مدل‌سازی عددی سازوکار باربری ستون‌های سنگی با استفاده از روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته در گذشته انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از روش عددی اجزای مجزا که توانایی خوبی در شبیه‌سازی رفتار مکانیک محیط‌های گسسته دارد، ظرفیت باربری ستون سنگی و سازوکار کماتش جانبی ایجادشده در زنجیره‌های باربر ذرات ستون سنگی سست بررسی شده است. در ادامه برخی پارامترهای مؤثر بر ظرفیت باربری ستون سنگی مانند دانه‌بندی، قطر و شرایط انتهایی ستون سنگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این شبیه‌سازی با نتایج تئوری اعتبار سنجی شده است که نشان می‌دهد روش عددی اجزای مجزا، توانمندی لازم را در شبیه‌سازی ستون سنگی دارا است. نتایج نشان می‌دهد افزایش قطر ستون سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود و ستون سنگی گیردار بین ۲۵ تا ۳۰ درصد ظرفیت باربری بیشتری نسبت به ستون سنگی شناور دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد کاهش اندازه دانه‌بندی تأثیرات محدودی بر کاهش ظرفیت باربری مجموعه ستون سنگ-خاک سست دارد. چراکه با افزایش تعداد ذرات در واحد سطح و به دنبال آن با افزایش تعداد تماس‌ها، تعداد ذرات بیشتری در باربری مشارکت داشته و چنانچه ذره‌ای که در زنجیره اصلی باربر واقع شده است، از مسیر خارج شود، باز توزیع نیرو صورت گرفته و کماتش کلی زنجیره‌های نیرویی رخ نمی‌دهد.

کلمات کلیدی

مدل‌سازی عددی، روش اجزای مجزا، ستون سنگی، کماتش زنجیره‌های باربر، دانه‌بندی

* عهده‌دار مکاتبات: h.bayesteh@qom.ac.ir

۱- مقدمه

ساخت ستون‌های سنگی به‌عنوان روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست بوده که به‌منظور کاهش نشست، افزایش ظرفیت باربری، کاهش پتانسیل روانگرایی و افزایش سرعت تحکیم زمین‌های سست به کار می‌رود [۱]. در اصلاح خاک به روش ستون‌های سنگی، مصالح دانه‌ای با مقاومت برشی بالا و قابلیت تراکم‌پذیری بسیار پایین جایگزین خاک‌های نرم و سست شده و سهم قابل توجهی از بارهای اعمالی به فونداسیون، به‌وسیله‌ی این ستون‌ها تحمل می‌شود. به‌طور عام سه سازوکار گسیختگی شکم‌دادگی، گسیختگی برشی و گسیختگی سوراخ شونده برای ستون سنگی تکی محتمل است [۲]. در سازوکار شکم‌دادگی، خرابی به علت عدم حمایت نیروی جانبی کافی خاک اطراف از ستون سنگی است، به‌طور معمول این نوع خرابی در عمق ۲ الی ۳ برابر قطر ستون سنگی اتفاق می‌افتد. مکانیزم گسیختگی برش کلی و جزئی، در ستون‌های کوتاه که بر بستر محکمی تکیه‌دارند اتفاق می‌افتد. نهایتاً مکانیزم گسیختگی سوراخ‌کننده در ستون‌های کوتاه که در خاک نرم احداث شده است اتفاق می‌افتد.

ستون‌های سنگی بخش زیادی از مقاومت و سختی خود را با محدودیت ایجادشده به‌وسیله‌ی خاک اطراف به دست می‌آورند. بدین مفهوم که در اثر بارهای وارده، کرنش جانبی در ستون سنگی و خاک اطراف آن ایجادشده و خاک اطراف تنش همه‌جانبه‌ی اضافی به ستون وارد می‌کند و مقاومت خاک اصلاح‌شده با استفاده از این ستون‌ها، از اندرکنش خاک و ستون تأمین می‌شود که ناشی از کرنش شعاعی ستون و خاک اطراف آن است [۲]؛ بنابراین تأثیر اندرکنش خاک با ستون سنگی، وابسته به ویژگی‌های مصالح ستون سنگی و هم‌وابسته به ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اطراف است [۳،۴]. بر این اساس لازم است رفتار واقعی ستون‌های سنگی در شرایط مرزی و خاک‌های متفاوت و در مقابل بارهای وارده موردبررسی قرار گیرد و با توجه به ماهیت رفتاری خاک طبیعی و مصالح ستون سنگی، میزان باربری و تغییر شکل‌های رخ‌داده به‌درستی ارزیابی شود.

در این راستا محققین با استفاده از ابزارهای آزمایشگاهی به بررسی عملکرد این ستون‌ها پرداخته‌اند. در گذشته مطالعات آزمایشگاهی مناسبی در بررسی رفتار ستون‌ها سنگی انجام‌شده است [۵-۱۰]. لیکن مشاهده می‌شود به

علت برخی محدودیت‌های روش‌های آزمایشگاهی، امکان کنترل تمامی پارامترهای ریزساختاری مؤثر (همانند نیروهای تماسی بین خاک و ستون، تأثیر دانه‌بندی، شکل ذرات، هندسه‌های پیچیده، شرایط مرزی متفاوت) در شناخت رفتار ستون سنگی میسر نیست. این در حالی است که در روش‌های عددی امکان کنترل پارامترهای مؤثر در رفتار ستون سنگی آسان‌تر بوده تا جایی که محققین پیش‌بینی می‌کنند در آینده روش‌های عددی (به‌عنوان آزمایشگاه مجازی) بیشتر مورد استقبال محققین ژئوتکنیک قرار خواهد گرفت [۱۱].

برخی مطالعات عددی مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته در حوزه ستون‌های سنگی انجام شد که نتایج ارزشمندی پیرامون نشست، تغییر شکل جانبی و نمودار تنش-کرنش بر اساس رفتار ماکروسکوپی (مدل‌سازی به روش اجزاء محدود) ارائه داده است [۱۲]. لیکن ستون‌های سنگی عموماً از مصالح شنی شسته تشکیل شده است و ماهیت رفتاری آن‌ها به‌صورت مجزا است و امکان ارزیابی دقیق عملکرد ستون‌های سنگی با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود میسر نیست [۱۳]. به همین منظور استفاده از مکانیک محیط‌های گسسته است در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۴].

یکی از مهم‌ترین روش‌های مبتنی بر مکانیک محیط‌های مجزا، روش اجزای مجزا است. روش اجزای مجزا نوعی از خانواده روش‌های عددی برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی یا شبه استاتیکی مجموعه ذرات منفصل که باهم اندرکنش دارند، است. کاندال [۱۵] برای اولین بار این روش را برای بررسی پایداری بلوک‌های سنگی مورد استفاده قرار داد. سپس استراک و کاندال [۱۶، ۱۷] از این روش برای مدل‌سازی رفتار مصالح دانه‌ای استفاده نمودند که در سال‌های اخیر در شبیه‌سازی محیط‌های دانه‌ای بسیار توسعه‌یافته است [۱۸، ۱۹]. این روش در ادامه برای شبیه‌سازی رفتار خاک‌های مسئله‌دار همچون کانی‌های متورم شونده و خاک‌های رمبند توسعه یافت [۲۰-۲۴]. این روش توسعه‌هایی محدودی نیز در حوزه ستون‌های سنگی داشته است. ایندراواتنا و همکاران [۱۳] یک مدل ترکیبی جدید تفاضل محدود-اجزای مجزا به‌منظور مطالعه تغییر شکل ستون سنگی تکی در خاک نرم ارائه دادند. در این روش نیروی تماسی در سطح تماس بین دو ناحیه ستون سنگی و خاک قرار دارد که به‌وسیله‌ی اتصال‌هایی مشخص می‌شوند که به مدل‌سازی اجزای مجزا اجازه می‌دهد تا نیرو و لنگر را به تفاضل محدود انتقال دهد.

انتقال می‌یابد. هر ذره در این مجموعه، در اثر اعمال نیرو از جانب ذرات مجاور، تحت اثر برآیند نیروهای وارده جابجا خواهد شد. در نهایت، مجموعه جابجایی‌های تمام ذرات موجود در مجموعه، منجر به بروز کرنش در آن مجموعه می‌شود. تکرار این مراحل در طول زمان دلخواه، اساس روش اجزای مجزا هست [۱۵].

در روش اجزای مجزا، نیروها و لنگرهای وارد بر هر ذره، برآیند نیروهای تماسی بین ذره موردنظر و ذرات مجاور آن است. این نیروها با استفاده از قوانین نیرو-جابجایی بین دو ذره تعیین می‌شوند. با داشتن مقدار هر نیرو و در نتیجه محاسبه برآیند نیروهای وارد بر هر ذره، با استفاده از قانون دوم نیوتن شتاب هر ذره محاسبه می‌شود. با دو بار انتگرال‌گیری از شتاب در بازه‌های زمانی کوچک، موقعیت جدید هر ذره معلوم می‌گردد و حلقه مذکور تا کرنش هدف تکرار می‌گردد [۱۹].

۲-۲- تئوری و فرمولاسیون

در این تحقیق از نرم‌افزار PFC که یک برنامه مبتنی بر روش اجزای مجزا است، برای شبه‌سازی استفاده گردیده است.

فرآیند محاسبات روش اجزای مجزا بدین صورت است که در ابتدای هر گام زمانی، ابتدا با استفاده از موقعیت فعلی ذرات (بافت مجموعه در ابتدای گام زمانی) تماس‌های بین ذرات شناسایی می‌شوند. در ادامه با استفاده از روابط نیرو-جابجایی، نیروهای تماسی بین هر دو ذره در تماس مستقیم باهم محاسبه می‌شود. سپس با محاسبه برآیند نیروهای تماسی و اعمال سایر نیروها از قبیل جاذبه و نیروهای ناشی از تنش‌های مرزی و نیروهای میرایی و غیره، برآیند نیروهای وارد بر هر ذره محاسبه شده و در ادامه با استفاده از قانون دوم نیوتن و داشتن شرایط اولیه در ابتدای گام زمانی مورد مطالعه، سرعت‌های هر ذره در طی آن گام زمانی و در نهایت موقعیت جدید ذرات در انتهای گام زمانی مورد مطالعه محاسبه می‌شود. موقعیت جدید ذرات (بافت جدید) و همچنین نیروهای بین‌ذره‌ای، سرعت‌های ذرات و غیره در انتهای گام زمانی فعلی به‌عنوان شرایط اولیه گام زمانی بعدی محاسبات در نظر گرفته می‌شود و مراحل تکرار می‌شود [۱۷].

قانون نیرو-جابجایی مورد استفاده در روش اجزای مجزا، بیانگر نحوه اندرکنش دو ذره در تماس باهم است. اگر دو ذره

نتایج به‌دست‌آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و نشان داد که مدل ترکیبی ارائه‌شده در این تحقیق می‌تواند رفتار بار-تغییر مکان ستون سنگی را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. گو و همکاران [۲۵-۲۸] به بررسی تأثیر استفاده از ژئوگرید در مدل‌سازی ستون سنگی منفرد با روش اجزای مجزا، به بررسی چهار عامل مهم سختی ژئوگرید، طول ستون، قطر ستون و اندازه ذرات پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از ژئوگرید با سختی بیشتر باعث افزایش بیشتر ظرفیت باربری می‌شود، ستون سنگی کوتاه سریع‌تر گسیخته شده و با افزایش قطر ستون مدول ستون سنگی کاهش می‌یابد. همچنین اندازه ذرات تأثیر ناچیزی بر روی منحنی تنش-کرنش داشته، با این حال ستون سنگی با مصالح درشت‌تر سختی بیشتری دارد. این محققین به ارزیابی رفتار ستون‌های سنگی و تأثیر پارامترهای فوق مستقل از محصورشدگی پرداخته نشده است. از منظر کاربردی ستون‌های سنگی که در ایران با روش وایبروفلوتاسیون، روش شمع ارتعاشی و حفاری و سنگ‌ریزی اجرا شده‌اند، ژئوگرید جهت محصورشدگی اجرا نشده است. بر این اساس نتایج تحقیق گو و همکاران [۲۵] که با رویکرد بررسی تأثیر ژئوگرید بوده است، قابل استفاده از منظر کاربردی در ایران نیست.

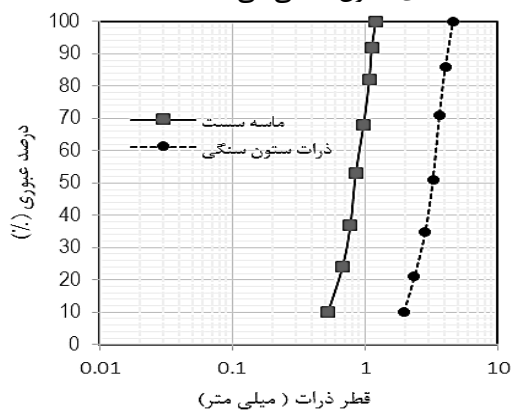
در تحقیقات ذکر شده مشخص شد که استفاده از روش اجزای مجزا برای بررسی رفتار ستون سنگی کارا بوده و به‌خوبی می‌تواند رفتارهایی از قبیل انتقال نیروی بین ذرات، حرکت‌های ذرات خاک و نیروهای وارد شده به هر ذره را نشان دهد. لیکن این تحقیقات محدود بوده و به بررسی تمامی جنبه‌های رفتاری ستون‌های سنگی پرداخته است. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد تاکنون تحقیقی در خصوص تأثیر دانه‌بندی و شرایط مرزی ستون سنگی بر ظرفیت باربری ستون‌های سنگی صورت نگرفته است. از آنجاکه خلأ بررسی این موضوع در پیکره دانش مشهود است، به‌عنوان هدف این تحقیق مدنظر قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مروری بر ادبیات فنی

هنگام بارگذاری بر یک مجموعه ذرات در روش اجزای مجزا، تنش‌ها که به مرزهای مجموعه ذرات وارد می‌شود، توسط ذرات آن مجموعه تحمل شده و نیروی مرزی از طریق تماس‌های موجود بین ذرات و به‌وسیله نیروهای تماسی

سانتیمتر منظور شد. نتایج تحقیقات پیشین در حوزه اعتبارسنجی نتایج روش اجزای مجزا نشان می‌دهد، بالابردن مقیاس دانه‌بندی ذرات در بازه‌های ذکر شده، تاثیری در نتایج نخواهد داشت [۲۹]. این ابعاد به طریقی تعیین شده است که با مقیاس ۲۰ برابر، به پروژه‌های واقعی شبیه باشد و نشان‌دهنده قطر ستون ۱ متر با طول ۶ متر در واقعیت باشد. برای از بین بردن تأثیرات مرزهای جانبی بر نتایج، فاصله مرزها از مرکز ستون سنگی به میزان ۵ برابر قطر ستون لحاظ گردید که این اندازه‌ها در دیگر مراجع نیز استفاده شده است [۲۷-۲۹]. دانه‌بندی مصالح ستون سنگی و ماسه با توجه مطالعه آزمایشگاهی موجود انتخاب گردید [۳۰] که در شکل ۱ دانه‌بندی استفاده‌شده نشان داده شده است. با توجه به مقادیر مندرج در مراجع ژئوتکنیک [۲]، پارامترهای ژئوتکنیکی این لایه‌ها مطابق جدول ۱ منظور گردید. در این جدول E، C، φ و Dr به ترتیب مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک و تراکم نسبی خاک ماسه سست و سنگ‌دانه‌های ستون سنگی می‌باشند.



شکل ۱- دانه‌بندی ذرات ستون سنگی و ماسه سست

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی خاک سست و ستون سنگی [۳۰].

مصالح	E [MPa]	C [kPa]	φ	Dr [%]
خاک سست	۱۵	۰	۳۰	۳۰
ستون سنگی	۴۰	۰	۳۷	۸۰

رویه صحت‌سنجی در این تحقیق از چهار مرحله مختلف تشکیل شده است. در دو مرحله اول، میکروپارامترهای شن و ماسه به صورت جداگانه به دست آمده‌اند. در این راستا با استفاده از نتایج آزمایش دومی، اقدام به محاسبه مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک شن و ماسه به تفکیک شده است و پارامترهای بین‌ذره‌ای به نحوی تغییر داده شده است تا اعداد مندرج در جدول ۱ برای میکروپارامترهای هر خاک

۱ و ۲ در تماس باهم باشند، ذرات در نقطه تماس تغییر شکل داده و مرکز هرکدام به اندازه α_i و δ_i جابجا خواهد شد. اگر مرکز جرم دو ذره A و B به ترتیب با سرعت‌های \dot{x}^A و \dot{x}^B جابجا شده و با سرعت‌های $\dot{\theta}^A$ و $\dot{\theta}^B$ دوران کنند، در یک گام زمانی Δt ، جابجایی‌های تماسی را می‌توان با استفاده از روابط تفاضل‌های محدود مطابق رابطه (۱) نوشت که n_i^c و t_i^c به ترتیب مؤلفه‌های i ام بردار نرمال و مماسی در نقطه تماس Δ_n و Δ_s به ترتیب جابجایی‌های نرمال و مماسی در یک گام زمانی می‌باشند.

$$\begin{aligned} (\Delta_n)_{N+1/2} &= [(\dot{x}_i^B - \dot{x}_i^A)_{N+1/2}] n_i^c \Delta t \quad i=1,2 \\ (\Delta_s)_{N+1/2} &= \{ [(\dot{x}_i^B - \dot{x}_i^A)_{N+1/2}] t_i^c - (\dot{\theta}^A | c^A + \dot{\theta}^B | c^B)_{N+1/2} \} \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

با در دست داشتن رابطه نیرو-جابجایی و همچنین جابجایی‌ها در نقاط تماس، نیروهای تماسی با استفاده از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند:

$$(F_n)_{N+1} = (F_n)_N + (\Delta F_n)_N = (F_n)_N + k_n (\Delta_n)_{N+1/2} \quad (2)$$

$$(F_s)_{N+1} = (F_s)_N + (\Delta F_s)_N = (F_s)_N + k_s (\Delta_s)_{N+1/2} \quad (3)$$

که k_n و k_s به ترتیب سختی‌های نرمال و مماسی تماس (قانون نیرو-جابجایی) می‌باشند. گام بعدی در چرخه تعیین نیروهای F_i و لنگر M وارد بر هر ذره است که به وسیله جمع کردن مؤلفه‌های نیروهای تماسی و لنگرها، به صورت زیر حاصل می‌شوند که n_K تعداد تماس‌های ذره شماره K با ذرات مجاور خود می‌باشد [۱۷]. مدل تماسی مقاومت غلتشی خطی^۱ مبتنی بر مدل تماس الاستیک خطی است که مقاومت غلتشی به آن افزوده شده است. اثر مقاومت غلتشی در تماس بین ذرات و از بین بردن انرژی آن‌ها می‌تواند بسیاری از رفتار ذرات دانه‌ای را به خوبی نشان دهد. این مدل شامل یک گشتاور بر روی نقطه اتصال برای مقابله با حرکت غلتشی ذره است. این مقاومت با مشخص کردن ضریب مقاومت غلتشی و مقدار شعاع مؤثر در ارتباط است و با تغییر موارد فوق می‌توان مقدار حرکت غلتشی در ذرات را تغییر داد [۱۸]. با توجه به وجود ذرات دانه‌ای که به سبب شکل نامنظم برای مدل‌سازی رفتار آن‌ها احتیاج به ایجاد مقاومت غلتشی است، از این مدل رفتاری استفاده می‌شود. انتخاب ابعاد مدل با توجه به محدودیت تعداد ذرات به علت بالا رفتن زمان آنالیز در مقیاس مدل فیزیکی آزمایشگاهی صورت گرفت که با توجه به ابعاد پیشنهاد شده توسط مراجع [۱۳]، قطر ستون سنگی معادل ۵ سانتیمتر و طول آن معادل ۳۰

می‌توان مدل‌سازی نمود به ترتیب ۰/۰۹۳ و ۰/۲۱۴۶ است [۳۲]. در جدول ۲ پارامترهای استفاده‌شده برای ماسه سست نشان داده‌شده است. همچنین ابعاد نمونه برای مدل‌سازی آزمایش مقاومت فشاری دومحوری به‌گونه‌ای انتخاب‌شده‌اند که نسبت ۱ به ۲ عرض به ارتفاع مشابه آزمون سه محوری حاکم باشد.

جدول ۲- پارامترهای میکرو استفاده‌شده برای مدل رفتاری

واحد	شن	ماسه	میکرو پارامتر
Pa	6×10^7	4×10^7	سختی نرمال
Pa	5×10^7	3×10^7	سختی برشی
-	۰/۳۵	۰/۳۶	ضریب اصطکاک
-	۰/۲۵	۰/۵۵	ضریب مقاومت غلتشی
kg/ m3	۲۰۰۰	۲۰۰۰	چگالی دانه
-	۰/۱۲۵	۰/۱۸۵	تخلخل

در مرحله اول و در راستای صحت سنجی میکروپارامترهای ماسه سست، در شکل ۲ نتایج آزمون دو-محوری ذرات ماسه تحت فشار همه‌جانبه مختلف و باندهای برشی ایجادشده نشان داده‌شده است. در این شکل به‌منظور مشاهده باند برشی ایجادشده، سرعت ذرات در انتهای نمونه رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زاویه ایجادشده باند برشی با راستای افق تقریباً برابر ۶۰ درجه و می‌توان گفت باند برشی ایجادشده با توجه به رابطه $\beta=45+\phi/2$ با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه برای ماسه تطابق دارد [۳۰].

بعد از اعتبارسنجی ذرات ماسه سست، در مرحله دوم به اعتبارسنجی میکروپارامترهای ذرات شنی پرداخته‌شده است. به‌منظور به دست آوردن پارامترهای میکرو ذرات شن متراکم، آزمایش مقاومت فشاری دومحوره تحت اثر تنش‌های همه‌جانبه ۶۰ و ۸۰ کیلو پاسکال صورت گرفت. با توجه به محاسبات انجام شده، تخلخل ۱۲/۵ درصد متناسب با تراکم ۸۰ درصد برای شن متراکم محاسبه‌شده است. در جدول ۲ میکرو پارامترهای منظور شده برای مدل‌سازی رفتار شن‌ها نشان داده‌شده است.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که به سبب تراکم نسبی بالای ذرات شن در مقابل ماسه، منحنی‌های رفتاری متفاوتی نسبت به ماسه سست با داشتن حداکثر مقاومت مشخص ایجادشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زاویه ایجادشده باند برشی با راستای افق تقریباً برابر ۶۲ درجه است و با توجه به رابطه $\beta=45+\phi/2$ می‌توان گفت باند برشی

حاصل و مطابق واقعیت باشد. در مرحله سوم، وزن مخصوص و میزان تخلخل محیط ارزیابی شده است تا تنش در عمق مطابق با رابطه تنش مؤثر تریاتی گردد. همچنین فشار جانبی اندازه‌گیری شده در مدل با تئوری فشاری جانبی رانکین در شرایط سکون مطابق باشد. در نهایت در مرحله چهارم، به‌منظور صحت‌سنجی عملکرد هم‌زمان مجموعه ماسه سست و ستون شنی، مقایسه ظرفیت باربری حاصل از روش اجزای مجزا با روش تحلیلی تریاتی انجام شده است. در بخش‌های بعد مراحل این صحت‌سنجی‌ها به ترتیب ارائه خواهد شد.

۲-۳- صحت سنجی میکروپارامترهای شن و ماسه

در شبه‌سازی ذرات درشت‌دانه (ذرات موجود در ستون سنگی) که دارای شکل نامنظم و تیز گوشگی هستند، یک رویکرد استفاده از ذرات نامنظم و مدل تماس الاستیک خطی^۲ است. در رویکرد دیگر از ذرات کروی استفاده شده و برای مدل‌سازی تیزگوشگی، مقاومت غلتشی بین ذرات منظور می‌گردد. در راستای کاهش حجم محاسبات و با عنایت به استقبال محققین از رویکرد دوم در برخی مراجع [۲۹، ۳۱]، در این تحقیق از مدل رفتاری دارای مقاومت غلتش استفاده گردید. مدل تماسی مقاومت غلتشی خطی^۲ مبتنی بر مدل تماس الاستیک خطی است که مقاومت غلتشی به آن افزوده‌شده است. اثر مقاومت غلتشی در تماس بین ذرات و از بین بردن انرژی آن‌ها می‌تواند بسیاری از رفتار ذرات دانه‌ای را به‌خوبی نشان دهد. این مدل شامل یک گشتاور بر روی نقطه اتصال برای مقابله با حرکت غلتشی ذره است. به تعبیری بیانگر تیز گوشگی در اندرکنش ذرات با یکدیگر است. این مقاومت با مشخص کردن ضریب مقاومت غلتشی و مقدار شعاع مؤثر در ارتباط است و با تغییر موارد فوق می‌توان مقدار حرکت غلتشی در ذرات را تغییر داد [۳۱].

مدل رفتاری ماسه سست نیز مدل تماسی مقاومت غلتشی خطی است. به‌منظور به دست آوردن پارامترهای میکرو ذرات ماسه سست، آزمایش مقاومت فشاری دومحوره تحت اثر تنش‌های همه‌جانبه ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال صورت گرفته است. در این راستا به‌منظور به‌دست‌آمده آوردن تخلخل متناسب با تراکم ۳۰ درصد برای ماسه سست محاسبات ذیل صورت گرفت. با توجه به اینکه مدل‌سازی در حالت دوبعدی در نرم‌افزار PFC صورت می‌گیرد. حداقل و حداکثر تخلخلی که در حالت دوبعدی در نرم‌افزار PFC

در تمامی قسمت‌های نمونه تقریباً برابر تخلخل موردنظر باشد.

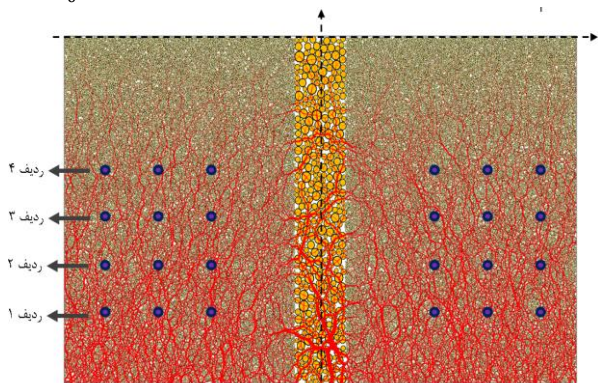
در شکل ۴ ستون سنگی مدل‌سازی شده در بستر ماسه‌ای سست نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع تنش متناسب با عمق خاک تغییر می‌کند و هر چه عمق خاک بیشتر می‌شود نیروی بین ذرات مقدار بیشتری را نشان می‌دهد که در حالت واقعی توزیع تنش در نمونه به همین شکل است. در این شکل ضخامت بیشتر زنجیره‌های نیرو، بیانگر بیشتر بودن نیروهای بین‌ذره‌ای در راستای قائم است که بیانگر مفهوم افزایش تنش مؤثر با عمق است. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، به‌منظور محاسبه تنش قائم و افقی در نقاط مختلف نمونه، دایره‌هایی اندازه‌گیری به شعاع ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان تنش قائم و افقی و نیز تخلخل را در اعماق مختلف ترسیم نمود.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود تنش قائم محاسبه شده در مدل در عمق‌های مختلف با تنش محاسبه شده به روش تئوری تنش مؤثر ترزاقی (رابطه ۴)) تطابق خوبی داشته و بیان می‌دارد مدل‌سازی شرایط اولیه تخلخل و وزن مخصوص به‌درستی صورت گرفته است [۳۰].

$$\sigma_v = \gamma \times h \quad (4)$$

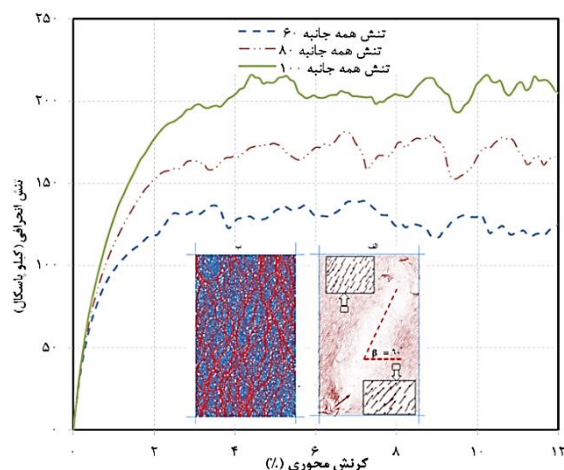
در شکل ۶ میانگین تنش در راستای قائم و افقی در عمق‌های مختلف محاسبه شده است که با استفاده از آن ضریب فشار جانبی ۰/۵۶ به دست آمد؛ که با مقدار به‌دست‌آمده از رابطه تئوری فشار جانبی رانکین (رابطه ۵)) در شرایط سکون ارائه شده در این شکل تقریباً برابر است [۳۰]. بر این اساس، سازوکار تولید اولیه نمونه قابل قبول است.

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (5)$$

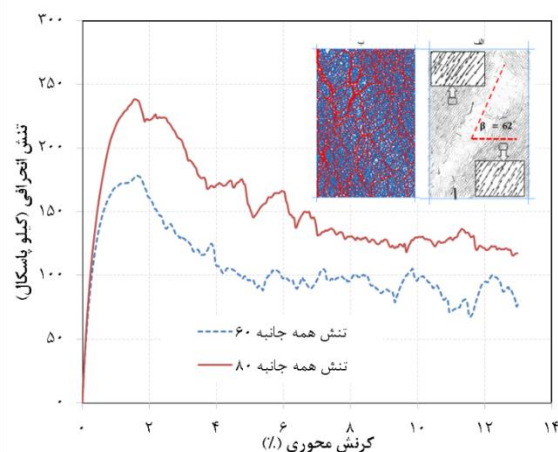


شکل ۴- ستون سنگی مدل شده، زنجیره‌های نیروی قائم و محل دواير اندازه‌گیری

ایجاد شده با زاویه اصطکاک حدود ۳۷ درجه برای شن تطابق دارد. رفتار اتساعی مشاهده شده نیز دلیل دیگری بر انتخاب صحیح میکروپارامترهای شن دارد.



شکل ۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایش مقاومت فشاری دومحوره برای ذرات ماسه



شکل ۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایش مقاومت فشاری دومحوره برای ذرات ستون سنگی

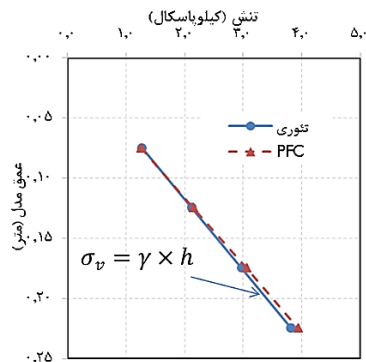
۲-۴- مدل‌سازی شرایط اولیه تنش

در مرحله سوم اعتبارسنجی مدل، بعد از اطمینان از صحت میکرو پارامترهای منظور شده برای ذرات ماسه سست و شن متراکم، مدل‌سازی ستون سنگی در بستر ماسه‌ای سست تحت تنش‌های برجا و مقایسه با تئوری تنش مؤثر ترزاقی صورت گرفت. در این رویکرد یکی از موارد مهمی که باید با دقت صورت گیرد، تولید نمونه‌ای همگن است. در این راستا بایستی توزیع تنش در نمونه متناسب باحالت واقعی بوده و ضریب فشار جانبی خاک در نمونه مدل‌سازی شده محاسبه شده و با مقادیر مجاز مقایسه شود. همچنین تخلخل

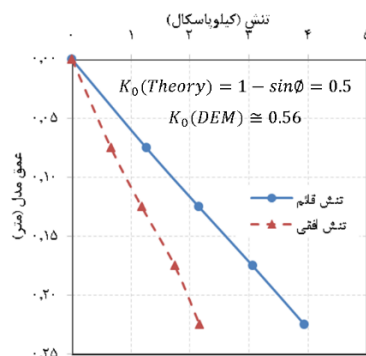
مطابق توصیه مراجع کنترل گردید که نیروهای نامتعادل^۴ که در حین تحلیل ایجاد می‌شوند، زیر ۵ درصد باشد تا ناپایداری عددی رخ ندهد [۲۲-۲۴]. شکل ۷ نمودار بار-نشست ستون سنگی مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. مطابق با رویه‌های استخراج بار نهایی در آزمون‌های بارگذاری صفحه در منحنی‌های نسبتاً خطی، بار نهایی معادل نشست ۱۵ درصد قطر صفحه بارگذاری است. در این تحقیق عرض صفحه ۱۵ سانتی‌متر فرض شده است که ۱۵ درصد آن معادل ۲/۲۵ سانتی‌متر خواهد بود. لذا بار نهایی این نمودار عدد حدود ۴۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد. برای مقایسه این عدد با تئوری ظرفیت باربری ترزاقی، ابتدا بایستی پارامترهای خاک سست و ستون شنی مطابق توصیه مراجع همگن‌سازی شود [۲]. در ادامه به محاسبه ظرفیت باربری با استفاده از رابطه ظرفیت باربری ترزاقی (رابطه (۱)) پرداخته خواهد شد. در این راستا به علت اینکه مدل موردنظر ترکیبی از دو نوع ذرات ماسه و شن بوده و بارگذاری بر روی این دو نوع از ذرات صورت می‌گیرد، ابتدا با میانگین‌گیری وزنی از پارامترهای مقاومت برشی ماسه و ستون سنگی، پارامترهای خاک همگن‌شده استخراج گردید. بر این اساس وزن مخصوص و زاویه اصطکاک معادل به ترتیب ۱۷/۳۳ کیلو نیوتن بر مترمکعب و ۳۲/۳ درجه خواهد شد. در نتیجه با استفاده از رابطه (۶)، ظرفیت باربری نهایی بر اساس روش تئوری معادل ۳۷ کیلو پاسکال خواهد شد. قابل‌ذکر است به سبب عدم وجود چسبندگی بین ذرات، از جمله تأثیر چسبندگی در روابط ترزاقی صرف‌نظر شده است. همچنین از آنجاکه بارگذاری در سطح زمین صورت گرفته است، از جمله سربار در رابطه ظرفیت باربری ترزاقی نیز صرف‌نظر شده است.

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \times \gamma \times B \times N_{\gamma} \quad (۶)$$

در این رابطه پارامترهای γ ، B و N_{γ} به ترتیب وزن مخصوص میانگین مصالح، عرض صفحه بارگذاری و ضریب ظرفیت باربری می‌باشند. با استفاده از نظریه ترزاقی ظرفیت باربری ستون سنگی با قطر ۵ سانتی‌متر، ۳۷ کیلو پاسکال به دست آمد. در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که ظرفیت به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار تقریباً برابر با ۴۰ کیلو پاسکال است که اختلاف ۸ درصدی بین ظرفیت باربری محاسبه‌شده به دو روش مدل‌سازی عددی و تئوری تقریباً ناچیز است و می‌توان گفت ظرفیت باربری ستون سنگی مدل‌سازی شده تطابق خوبی با نتایج تئوری دارد. در این



شکل ۵- میانگین تنش قائم در دو حالت تئوری و مدل‌سازی با PFC

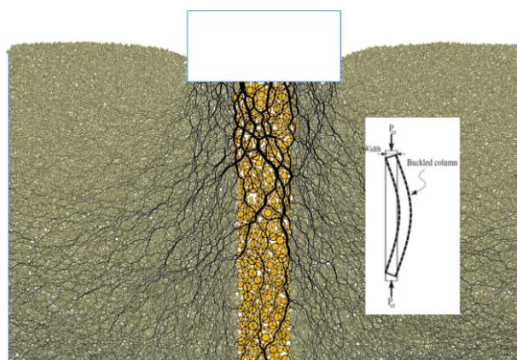


شکل ۶- میانگین تنش قائم و افقی در مدل‌سازی با PFC و مقایسه با تئوری فشار جانبی رانکین در حالت سکون

۲-۵- صحت سنجی عملکرد هم‌زمان خاک سست

و ستون سنگی

در سه مرحله صحت‌سنجی ارائه‌شده در بخش‌های قبل، پارامترهای بین‌ذره‌ای شن و ماسه به تفکیک و شرایط تنش برجا ارزیابی شد و مقایسه لازم با تئوری صورت گرفت. به‌منظور صحت‌سنجی عملکرد هم‌زمان ستون شنی و خاک سست اطراف، آزمون بارگذاری پی بر روی مجموعه ستون شنی و خاک به‌عمل‌آمده و با روش‌های تحلیلی ظرفیت باربری مقایسه خواهد شد. برای نیل به این هدف، نتایج حاصل از مدل‌سازی ستون سنگی با قطر ۵ سانتی‌متر با نتایج حاصل از محاسبات تئوری مقایسه خواهد شد. برای این منظور بارگذاری به‌تدریج انجام و تغییر شکل‌ها قرائت گردید. برای بارگذاری در مدل، بارگذاری توسط صفحه صلب که نماد فونداسیون است، با نرخ ثابت ۰/۱ میلی‌متر در دقیقه بر روی سطح خاک نفوذ تنش لازم را به خاک اعمال می‌کند. این آزمون به بیانی شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری صفحه در مقیاس آزمایشگاهی است. لازم به ذکر است در حین آنالیز مسئله،

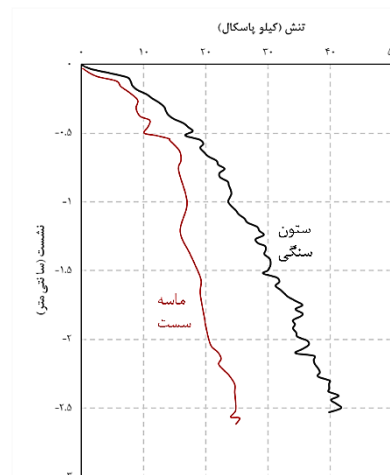


شکل ۸- نیروهای به وجود آمده در ذرات در انتهای بارگذاری و کماتش زنجیره نیروی اصلی

شکل ۹ جهت حرکت ذرات را در حین بارگذاری نشان می‌دهد که حرکت ذرات ماسه سست اطراف ستون سنگی را می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که بیان شد به علت عدم حمایت نیروی جانبی کافی، ذرات ماسه به سمت کناره‌ها در حرکت است و باعث ایجاد شکم‌دادگی در ستون سنگی می‌شود. این موضوع نیز تأییدی بر عدم کفایت مهار جانبی ستون سنگی و کماتش زنجیره‌های نیروی آن است. به‌منظور مشاهده شکم‌دادگی ستون سنگی موقعیت ذرات ستون سنگی در انتهای بارگذاری ثبت می‌شود که در شکل ۱۰ می‌توان موقعیت تعدادی از ذرات کناری ستون سنگی را در انتهای بارگذاری مشاهده کرد؛ که نشان می‌دهد ذرات ستون سنگی تا عمق تقریباً $2/5$ برابر قطر ستون سنگی تغییر مکان افقی قابل توجهی داشته‌اند و شکم‌دادگی در این ناحیه رخ داده است. این شکم‌دادگی با بردارهای سرعت نشان داده شده در شکل ۹ تطابق دارد.

یکی از مواردی که می‌تواند تأییدی بر شکم‌دادگی ستون باشد، تغییرات تنش‌های افقی است که افزایش آن در راستای افق، بیانگر چرخش محور اصلی و حرکت ستون به داخل خاک سست است. در این راستا در نسبت تنش‌های افقی بعد از بارگذاری به تنش‌های افقی قبل از اعمال بار در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در عمق‌های کمتر تنش‌های افقی به نسبت بیشتری افزایش پیدا کرده‌اند. این افزایش تنش افقی در عمق‌های $0/075$ و $0/125$ متری بیشتر مشاهده می‌شود و هر چه به مرکز مدل نزدیک‌تر شویم، این نسبت نیز افزایش بیشتری خواهد داشت. این موضوع می‌تواند شکم‌دادگی ستون سنگی را تا عمق تقریباً $0/13$ به علت افزایش بیشتر تنش‌های افقی تا این عمق توجیه کند.

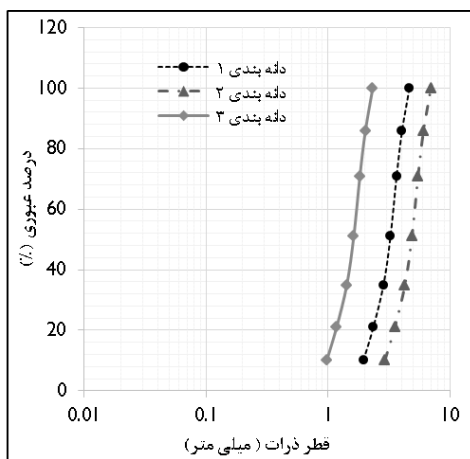
شکل منحنی باربری خاک سست بدون ستون سنگی نیز نشان داده شده است که بیانگر این است که اجرای ستون سنگی تا دو برابر ظرفیت باربری را افزایش داده است.



شکل ۷- منحنی ظرفیت باربری ستون سنگی با قطر ۵ سانتی‌متر و مقایسه آن با حالت بدون ستون سنگی

۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به بررسی سازوکار باربری ستون بلند که تا بستر سخت ادامه خواهد داشت، پرداخته خواهد شد که زنجیره‌های نیروی ایجاد شده در انتهای شبیه‌سازی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به ابعاد نمونه مدل‌سازی شده و با توجه به اینکه نسبت طول به قطر برابر ۶ است، می‌توان گفت ستون سنگی مدل‌سازی شده ستون سنگی بلند است (ستون سنگی با نسبت طول به قطر بیشتر از ۴ الی ۶، ستون سنگی بلند محسوب می‌شود [۲]). همچنین با توجه به اینکه خاک اطراف ستون سنگی سست است، به دلیل عدم حمایت نیروی جانبی کافی خاک اطراف، خرابی ستون سنگی به صورت انبساط جانبی است که در این شکل از تمایل زنجیره‌های اصلی نیرو قابل‌درک است. به عبارتی زنجیره‌های قوی به انتهای ستون منتقل نشده است. در مکانیزم خرابی ایجاد شده می‌توان بیان داشت که ستون سنگی بلند و بدون مهار جانبی که متکی بر انتهای گیردار بوده و نیروها در طول آن‌ها منتقل می‌شود، همانند یک ستون بلند و لاغر عمل کرده که چنانچه بارمحوری روی آن از حد لاغری ستون تجاوز کند، کماتش آن را به دنبال دارد. این مفهوم به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است. در این تصویر کماتش زنجیره باربر اصلی نیرو مشاهده می‌شود که به دلیل عدم مهار جانبی کافی است.

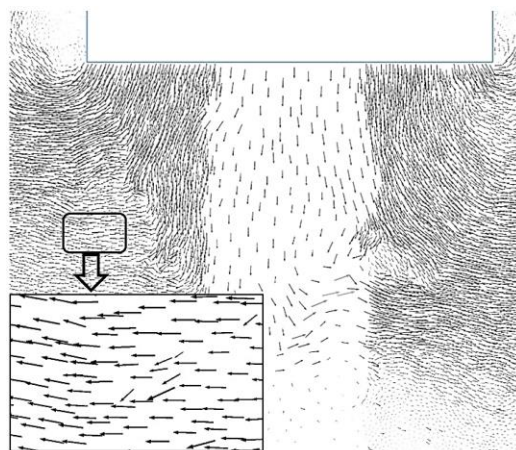


شکل ۱۲- دانه‌بندی‌های متفاوت مورد استفاده به‌عنوان شن ستون سنگی

در شکل ۱۳ ظرفیت باربری در سه حالت مختلف باهم مقایسه شده است. نتایج ظرفیت باربری نشان‌دهنده این موضوع است که دانه‌بندی تأثیرات محدودی بر افزایش ظرفیت باربری دارد.

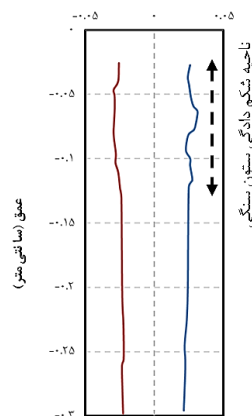
به علت دایره‌ای بودن ذرات، در ستون سنگی با دانه‌بندی ریزتر درگیری بیشتری بین ذرات نسبت به حالت دانه‌بندی بزرگ‌تر ایجاد شده است، به همین علت ستون سنگی با دانه‌بندی ریزتر تقریباً یک الی دو درصد ظرفیت باربری بیشتری نسبت به حالت دانه‌بندی درشت‌تر دارد. به عبارتی با افزایش تعداد ذرات در واحد سطح، با مشارکت داشته و چنانچه یک‌ذره از زیر بار شانه خالی کند، باز توزیع مناسب بین دیگر زنجیره‌های نیرویی ایجاد شده و باربری افزایش پیدا می‌کند که می‌توان زنجیره‌های نیروی ایجاد شده در ستون سنگی با دانه‌بندی مختلف را در شکل ۱۴ مشاهده کرد. مشاهده می‌شود در ستون سنگی با دانه‌بندی ریزتر (دانه‌بندی ۳) زنجیره‌های نیروی قوی‌تر با تعداد بیشتری بین ذرات ایجاد شده که نشان می‌دهد تعداد ذرات بیشتری در باربری مشارکت داشته‌اند. لیکن این روند در ذرات با دانه‌بندی بزرگ‌تر مشاهده نمی‌شود.

آنچه بدیهی است با توجه به تمایل ذرات به چرخش حین وجود بارهای نامتعادل، اگر ذرات بیشتری باهم درگیر باشند، باز توزیع زنجیره‌های نیرویی راحت‌تر شکل می‌گیرد.

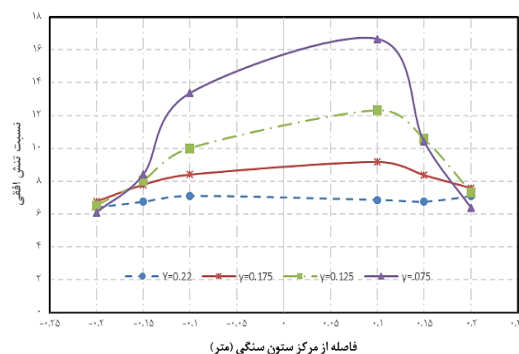


شکل ۹- جهت حرکت ذرات در انتهای بارگذاری

به‌منظور بررسی اثر دانه‌بندی ستون سنگی بر ظرفیت باربری ستون سنگی و مکانیزم خرابی آن، علاوه بر دانه‌بندی اصلی ستون سنگی، دو نوع دانه‌بندی با اندازه‌های نصف دانه‌بندی اصلی و $1/5$ برابر دانه‌بندی اصلی مطابق شکل ۱۲ مورد بررسی قرار گرفت.

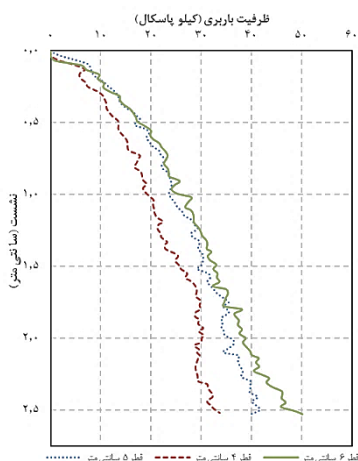


شکل ۱۰- جابجایی افقی ذرات ستون سنگی در ناحیه شکم‌دادگی

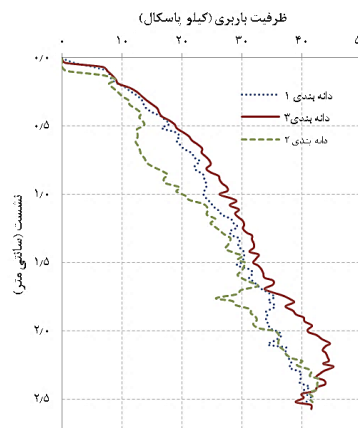


شکل ۱۱- نسبت تنش افقی بعد از بارگذاری به تنش افقی قبل از بارگذاری در نقاط مختلف

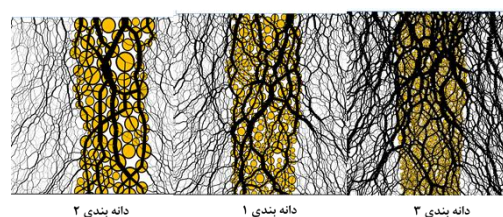
سطح از منظر تئوری نیز ظرفیت باربری کلاسیک نیز قابل تأیید است. با توجه به اینکه عرض صفحه بارگذاری ثابت و ۱۵ سانتی‌متر است، با قرار دادن مقادیر N_r و دیگر مقادیر در رابطه (۶)، می‌توان مشاهده کرد طی مراحل افزایش قطر ستون سنگی، ظرفیت باربری افزایش پیدا می‌کند. ولی در ادامه تأثیر افزایش قطر بر ظرفیت باربری نسبت به حالت قبل کاهش یافته است. این نتیجه با این رویکرد است که نحوه بارگذاری به صورت بار ثابت نبوده و با اعمال تغییر مکان تا تغییر شکل مدنظر ادامه یافته است. مشاهده می‌شود در ابتدا با افزایش قطر از ۴ به ۵ سانتی‌متر، افزایش ۲۳ درصدی در ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. درحالی‌که اگر قطر ستون سنگی از ۵ به ۶ سانتی‌متر افزایش یابد، ظرفیت باربری ۱۰ درصد افزایش خواهد داشت. قابل‌ذکر است اجرای مراحل بارگذاری تا حد نشست مجاز و قابل‌تحمل برای فونداسیون‌ها که میزان ۲/۵۴ سانتی‌متر است، ادامه یافته است. این رفتار مشاهده‌شده جهت نتیجه‌گیری کلی بایستی با مدل‌سازی‌های بیشتر در آینده بیشتر واکاوی گردد. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر ظرفیت باربری ستون‌های سنگی، شرایط انتهایی ستون سنگی است که دو حالت ستون سنگی متکی بر نوک و شناور را شامل می‌شود. در شکل ۱۶ ظرفیت باربری ستون سنگی شناور با قطرهای مختلف باهم مقایسه شده است. نتایج حاصل‌شده نشان‌دهنده این موضوع است که مشابه ستون‌های سنگی گیردار در حالت شناور نیز افزایش قطر باعث افزایش باربری ستون سنگی می‌شود. مشاهده می‌شود میزان باربری برای ستون‌های با قطر ۴، ۵ و ۶ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۲۴/۵، ۳۱ و ۳۳ کیلو پاسکال خواهد بود.



شکل ۱۵- ظرفیت باربری ستون سنگی با قطرهای مختلف در حالت گیردار

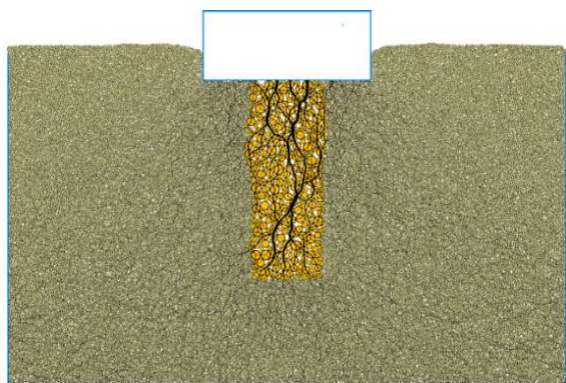


شکل ۱۳- ظرفیت باربری ستون سنگی با دانه‌بندی مختلف

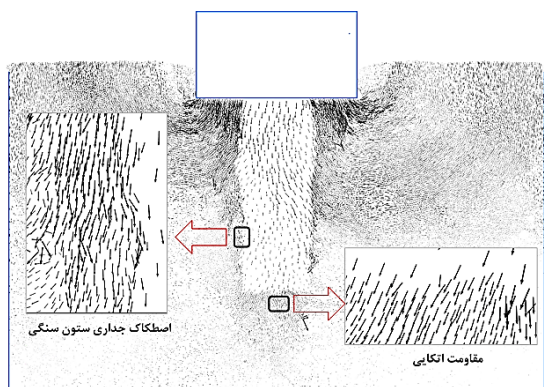


شکل ۱۴- زنجیره‌های نیروی ایجادشده در ستون سنگی با دانه‌بندی مختلف

به‌منظور بررسی اثر قطر ستون سنگی در ظرفیت باربری، مدل‌سازی با قطرهای ۴، ۵ و ۶ سانتی‌متر انجام شد، در شکل ۱۵ ظرفیت باربری برای سه قطر مختلف باهم مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر، ظرفیت باربری ستون سنگی افزایش می‌یابد. افزایش ظرفیت باربری را می‌توان به علت افزایش سطح باربر ستون سنگی با افزایش قطر توجیه کرد. در این راستا چون ستون سنگی سختی بیشتری نسبت به خاک اطراف دارد، با افزایش قطر و ثابت بودن عرض صفحه بارگذاری، سختی قسمتی که تحت بارگذاری قرار گرفته افزایش می‌یابد و در نتیجه ظرفیت باربری ستون سنگی افزایش می‌یابد. گفتنی است در این رویکرد پس از همگن‌سازی پارامترهای مقاومت برشی، مدول الاستیسیته و دانسیته، از روابط متعارف تعادل حدی برای ارزیابی ظرفیت باربری استفاده می‌گردد. بر این اساس، روش‌های تحلیلی حوزه ستون‌های سنگی همانند شمع‌ها که مقاومت نوک و یا مقاومت جداره مطرح است، بعضاً مورد توجه مراجع قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق، رویکرد استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی و با منظورکردن روش هموزن سازی، در راستای اعتبار سنجی روش اجزای مجزا استفاده شده است. با این رویکرد می‌توان بیان داشت که درصد افزایش ظرفیت باربری با افزایش نسبت



شکل ۱۷- ستون سنگی شناور با قطر ۶ سانتیمتر در انتهای بارگذاری

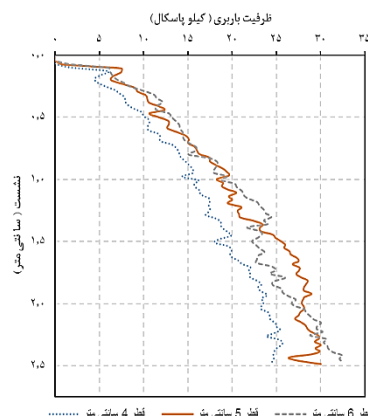


شکل ۱۸- جهت حرکت ذرات در ستون سنگی شناور با قطر ۶ سانتی‌متر

۴- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی رفتار ستون‌های سنگی در خاک‌های سسی و ارزیابی برخی پارامترهای تأثیرگذار در رفتار آن به‌عنوان هدف این تحقیق مدنظر قرار گرفت. با عنایت به ماهیت دانه‌ای بودن ستون سنگی، استفاده از روش اجزای مجزا که مبتنی بر مکانیک محیط‌های گسسته است، انتخاب گردید. در ادامه، با انتخاب مدل رفتاری مناسب، پارامترهای بین‌ذره‌ای (میکرو) به نحوی انتخاب شد که پارامترهای ژئوتکنیکی خاک شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک آن مطابق واقعیت گردد. سپس ظرفیت باربری ستون سنگی با نتایج تحلیلی مقایسه گردید. نهایتاً تأثیر شرایط انتهایی ستون و نیز منحنی دانه‌بندی در رفتار ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد:

الف - ارزیابی رفتار ستون سنگی با دقت قابل قبول با روش اجزای مجزا قابلیت شبیه‌سازی است و ارزیابی‌های میکرو مکانیکی خصوصاً کمانش زنجیره‌های باربر نیرو و مسیر حرکت ذرات قابل مشاهده است.



شکل ۱۶- ظرفیت باربری ستون سنگی با قطرهای مختلف در حالت شناور

به‌منظور بررسی اثر شرایط انتهایی مدل‌هایی با طول ۲۰ سانتی‌متر و قطرهای ۴، ۵ و ۶ سانتیمتر مورد بررسی قرار گرفت که زنجیره‌های نیرو در شکل ۱۷ نشان داده شده است. نتایج حاصل شده نشان‌دهنده این موضوع است که مشابه ستون‌های سنگی گیردار در حالت شناور نیز افزایش قطر باعث افزایش باربری ستون سنگی می‌شود. با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت اجرای ستون سنگی به صورت گیردار باعث افزایش ۲۵ الی ۳۰ درصدی ظرفیت باربری نسبت به حالت شناور می‌شود. به‌منظور مشاهده دقیق‌تر نحوه جابجایی ذرات، سرعت حرکت ذرات در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات ماسه سست اطراف و زیر ستون سنگی جابجایی قائم دارند. جابجایی قائم ذرات ماسه زیر ستون سنگی نشان‌دهنده باربری اتکایی ایجاد شده توسط ماسه است و جابجایی قائم ذرات ماسه اطراف ستون سنگی نشان‌دهنده اصطکاک جانبی ایجاد شده بین ذرات ماسه و ستون سنگی است؛ یعنی ظرفیت باربری ستون سنگی در این حالت مجموع مقاومت اتکایی و اصطکاک جداري ستون سنگی است. که این حالت به علت جابجایی قائم ذرات ستون سنگی رخ داده است و می‌توان گفت خرابی ستون سنگی به صورت پانچ کردن بوده است.

جدول ۳- مقایسه ظرفیت باربری ستون سنگی در دو حالت گیردار و شناور

درصد اختلاف	گیردار (kPa)	شناور (kPa)	قطر (cm)
۲۵	۳۲	۲۴٫۵	۴
۲۶	۴۲	۳۱	۵
۳۱	۴۸	۳۳	۶

- [10] Dash, S.K., and Mukual C.B., (2013), "Influences of geosynthetic encasement on the performance of stone columns floating in soft clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 50, No.7, pp. 754-765.
- [11] Zdravkovic, j., and Carter, j., (2008), "Constitutive and numerical modelling", *Geotechnique*, Vol. 58, No. 00, pp. 1-8.
- [12] Keykhosropur L., Soroush A., and Imam R., (2012), "3D numerical analyses of geosynthetic encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 36, pp 61-68.
- [13] Indraratna, B., Ngo, N.T., Rujikiatkamjorn, C., and Sloan, S.W., (2015), "Coupled discrete element-finite difference method for analysing the load-deformation behaviour of a single stone column in soft soil", *Computers and Geotechnics*, Vol. 63, pp. 267-278.
- [14] Potts, D.M., (2003), "Numerical analysis: a virtual dream or practical reality?", *Geotechnique*, Vol. 53, No. 6, pp. 535-573.
- [15] Cundall, P.A., and Strack, D.L., (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", *Géotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
- [16] Cundall, P.A., and Strack, D.L., (1978), "The Distinct element method as a tool for research in granular media", *Minneapolis, Department of Civil and Mineral Engineering Ltd.*
- [17] Cundall, P.A., and Strack, D.L., (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies," *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp: 47-65.
- [18] Bayesteh, H., and Mansouriboroujeni, R., (2019), "Mechanisms of settlement of a rubble mound breakwater on a soft soil in tidal flats", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 38, Issue 10, pp. 1163-1176.
- [19] O'Sullivan, C., (2011), "Particle-Based Discrete Element Modeling: Geomechanics Perspective", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 11, Issue. 6, pp. 449-464.
- [20] Khabazian, M., Mirghasemi, A.A., and Bayesteh, H., (2018), "Compressibility of montmorillonite/kaolinite mixtures in consolidation testing using discrete element method", *Computers and Geotechnics*, 104, pp. 271-280.
- [21] Bayesteh, H., and Mirghasemi, A.A., (2013), "Procedure to detect the contact of platy cohesive particles in discrete element analysis", *Powder Technology*, 244, pp. 75-84.
- [22] Bayesteh, H. and Ghasempour, T., (2018), "Role of the location and size of soluble particles in the mechanical behavior of collapsible granular soil: a DEM simulation" *Computational Particle Mechanics*, Vol. 6, Issue 3, pp 327-341.
- [23] Khabazian, M., Mirghasemi, A.A., and Bayesteh, H., (2020), "Discrete element simulation of drying effect on the volume and equivalent effective stress of kaolinite". *Geotechnique*, doi.org/10.1680/jgeot.18.P.239.

ب - در ستون‌های متکی به نوک، ظرفیت باربری ستون سنگی و سازوکار کمانش جانبی ایجادشده در زنجیره‌های باربر ذرات ستون سنگی ارزیابی شد و نشان داده شد مکانیزم حاکم در کاهش ظرفیت باربری آن، کمانش زنجیره باربری اصلی نیرو متأثر از خاک ضعیف جانبی است.

ج - کاهش اندازه دانه‌بندی تأثیرات محدودی بر کاهش ظرفیت باربری مجموعه ستون سنگ-خاک سست دارد. چراکه با افزایش تعداد ذرات در واحد سطح و به دنبال آن با افزایش تعداد تماس‌ها، تعداد ذرات بیشتری در باربری مشارکت داشته و چنانچه ذره‌ای که در زنجیره اصلی باربر واقع شده است، از مسیر خارج شود، باز توزیع نیرو صورت گرفته و کمانش کلی رخ نمی‌دهد.

مراجع

- [1] Soroush A, Tabarsaz S., (2010), "Numerical analysis of ground reinforced with a stone column group", *IQBQ.*, 10 (2).
- [2] FHWA, (1983), "Design and construction of stone column", Volume I, Report No. FHWA/RD-83/026.
- [3] Wu, C. S., and Hong, Y. S. (2008), "The behavior of a laminated reinforced granular column", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 26, pp. 302-316.
- [4] Wu, C. S., Hong, Y. S., and Lin, S. C., (2009), "Axial stress strain relation of encapsulated granular column", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, pp. 226-240.
- [5] Hu, W., Wood, D.M. and Stewart, W., (1997), "Ground improvement using stone column foundations: result of model tests", *Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, pp.247-256.
- [6] Malarvizhi, S. N. and Ilamparuthi, K., (2004), "Load versus settlement of claybed stabilized with stone & reinforced stone columns", *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, June 21-24, Seoul, Korea, pp. 322-329.
- [7] McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., and Graham, J., (2004), "Modelling vibrated stone columns in soft clay", *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, Vol. 153, No. 3, pp. 137-149.
- [8] Gniel, J., and Bouazza, A., (2009), "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns", *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3), pp. 167-175.
- [9] Malekpoor, M.R., and Toufigh, M.M., (2010), "Laboratory study of soft soil improvement using lime mortar- (well graded) soil columns", *Geotechnical Testing Journal (ASTM)*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-11.

vertical deformations of stone columns in model tests.” *Geosynthetics Int.* 23 (2), pp. 100–112.

[29] Coetzee, C. J. "Calibration of the discrete element method." *Powder Technology* 310 (2017): 104-142.

[30] Bowles, J.E., (1982), “Foundation analysis and design”, McGraw-Hill, Third edition. 816 pp.

[31] Fan, H., D. Guo, J., Dong, X., Cui, M., and Zhang, Z., (2018), “Discrete element method simulation of the mixing process of particles with and without cohesive interparticle forces in a fluidized bed”, *Powder Technology*, Vol. 327, No. 1, p.p: 223-231.

[32] Ciantia, M.O., Arroyo, M., O’Sullivan, C., and Gens, A., (2016), “DEM Investigation of stress and strain evolution around displacement piles in sand”, London, 2016 BGA Annual Conference.

[24] Bayesye, H., and Hosseini, A., (2021), "Effect of mechanical and electro-chemical contacts on the particle orientation of clay minerals during swelling and sedimentation: A DEM simulation", *Computers and Geotechnics*, Vol. 130, pp. 103913.

[25] Gu, M., Han, J., and Zhao, M., (2020), “Three-dimensional DEM analysis of axially loaded geogrid-encased stone column in clay bed”, *International of Geomechanics*, 20(3), pp. 1-11.

[26] Gu, M., J. Han, and M. Zhao., (2017a), “Three-dimensional DEM analysis of single geogrid-encased stone columns under unconfined compression: A parametric study.” *Acta Geotech.* 12 (3): pp. 559–572.

[27] Gu, M., J. Han, and M. Zhao., (2017b), “Three-dimensional discrete-element method analysis of stresses and deformations of a single geogridencased stone column.” *Int. J. Geomech.* 17 (9): pp. 04017070.

[28] Gu, M., M. Zhao, L. Zhang, and J. Han., (2016), “Effects of geogrid encasement on lateral and

¹ (Linear Rolling Resistance Contact Model)

² Linear elastic

³ (Linear Rolling Resistance Contact Model)

⁴ Unbalanced force