



مروری کوتاه بر روش‌های مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک

سیده زهرا حسینی^۱، مهدی قهرمانی مقدم^۲

۱- کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه فنی و مهندسی گرگان

۲- کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه یزد

Zhoseini71@yahoo.com

چکیده

مدل‌سازی فیزیکی، ابزاری مهم برای مطالعه‌ی مشکلات گوناگون در مهندسی ژئوتکنیک است که برای اعتبارسنجی مدل‌های تئوری یا عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. می‌توان مدل‌سازی فیزیکی را در مقیاس حقیقی و یا در مقیاس کوچک انجام داد که کاربرد مدل‌های کوچک مقیاس در زمان و هزینه صرفه‌جویی می‌کند. اساساً مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک به دو دسته‌ی مدل‌سازی در شرایط کم‌تنش (۱g) و مدل‌سازی در شرایط پرتنش (ng) تقسیم می‌شود. دسته‌ی اول در مخازن ساده و میز لرزه‌ای ۱g (بررسی اثرات بارگذاری زلزله) و دسته‌ی دوم در مخازن کالیبراسیون، سانتریفوژهای ژئوتکنیکی، ظرف‌های محصورکننده‌ی مخروطی ناقص و میز لرزه‌ای سانتریفوژی انجام می‌شوند. در این مقاله، به بررسی انواع روش‌های مدل‌سازی فیزیکی، مزایا و معایب آن‌ها و نحوه‌ی مرتبط کردن نمونه‌ی اصلی و مدل با استفاده از فاکتورهای مقیاس پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: مهندسی ژئوتکنیک، مدل‌سازی فیزیکی، فاکتورهای مقیاس، مدل‌های کوچک مقیاس، مدل‌های مقیاس حقیقی

۱- مقدمه

یک مدل، ساده‌سازی دقیق و مناسب پدیده‌های طبیعی و واقعی است. در مدل‌سازی ابتدا اجزای محیط واقعی انتخاب شده و متناسب با هدف مدل‌سازی، ویژگی‌هایی از هر یک از اجزای واقعی در نظر گرفته می‌شود، یعنی، به ازای هر یک از اجزای محیط واقعی یک نمونه‌ی کوچک ساخته می‌شود و با برقراری ارتباطی مشابه با ارتباط اجزای واقعی در میان نمونه‌های ساخته‌شده، محیط واقعی مدل‌سازی می‌شود [۱].

مدل‌سازی فیزیکی، یک ابزار برای مهندسی ژئوتکنیک به منظور مطالعه‌ی مشکلات برهم‌کنش پیچیده‌ی مرتبط با خاک‌ها می‌باشد که از اواسط دهه‌ی ۱۹۵۰ مورد توجه قرار گرفت [۲]. استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در طراحی پی، پل کاملاً مشهود است [۳]. مدل‌سازی فیزیکی به منظور اعتبارسنجی فرضیه‌های تجربی یا تئوری انجام می‌گیرد. بنابراین، ساختارهای ژئوتکنیکی نیز مدل‌سازی فیزیکی هستند. طراحی ژئوتکنیکی، فرضیه‌ای را درباره‌ی رفتار مورد انتظار ایجاد می‌کند که ممکن است بسته به میزان پاسخ ارائه‌شده توسط سیستم ژئوتکنیکی، با جزئیات بیشتر یا کمتر آزمایش گردد. آزمون‌های آزمایشگاهی المان‌های کوچک خاک و آزمایشات میدانی درجا تعدادی مدل را در مورد روشی که در آن خاک به این موارد پاسخ می‌دهد، پیش‌فرض

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

می‌کنند. در بسیاری از موارد، مدل‌های اساسی در آزمایش پنهان هستند. مدل‌های استحکام (strength) و سختی (stiffness) خاصی وجود دارند که برای مواد مشابه در گذشته استفاده شده‌اند و بنابراین، می‌توان انواع آزمایشات خاص مانند نرخ‌های بارگذاری را تقریباً بدون فکر درباره‌ی آن‌ها انتخاب کرد [۴].

مراحل اصلی ایجاد یک مدل فیزیکی شامل نوع مدل فیزیکی، ابعاد مدل فیزیکی، فاکتور مقیاس، مواد مشابه و ابزار مدل هستند. روش و مراحل مدل‌سازی فیزیکی باید از لحاظ مشخصات آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی و تکرارپذیری مدل مشابه تحت شرایط یکسان برای چندین بار تأیید شوند. مدل‌سازی فیزیکی، اندازه‌ی یک سازه‌ی بزرگ و پیچیده تحت عنوان «نمونه-ی اصلی (prototype)» را کاهش می‌دهد و در عین حال، مشخصات فیزیکی مشابه و برهم‌کنش‌های مشابه با محیط را برای ایجاد رفتار حقیقی سازه در مجموعه‌ای از شرایط بارگذاری حفظ می‌کند. پیوند بین نمونه‌ی اصلی و مدل با بیان‌های تحلیلی بین پارامترهای فیزیکی و هندسی مرتبط با آن‌ها (قوانین تشابه یا فاکتورهای مقیاس) صورت می‌گیرد. طراحی مدل فیزیکی دارای مقیاس براساس هدف مطالعه و مشخصات نمونه‌ی اصلی صورت می‌گیرد. در این حالت، مدل فیزیکی باید یک نمایش عدد حقیقی از نمونه‌ی اصلی باشد و از سوی دیگر، فاکتور مقیاس نسبت بین پارامتر نمونه‌ی اصلی و پارامتر مدل است [۱، ۵]. در عمل تمام مدل‌های ژئوتکنیکی احتمالاً به‌آسانی رد می‌شوند، اما در محدوده‌ای خاص، تکذیب این مدل‌ها بسیار ضعیف است و یافتن این محدوده از اهمیت بالایی برخوردار است [۱].

مزیت اصلی مدل‌سازی فیزیکی این است که مطالعه‌ی پارامتریک شامل بررسی هندسه‌ی مدل، انواع متفاوت یا ادغام بارگذاری‌ها و شرایط خاک را ممکن می‌سازد [۶، ۷]. به‌علاوه، مطالعه‌ی رفتار سازه در مراحل مختلف فرآیند ساخت را مقدور می‌کند [۸]. مدل‌سازی فیزیکی یکی از روش‌هایی است که برای بررسی رفتار سازه‌ها در بارگذاری‌های زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از حرکات ورودی که قبلاً در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های واقعی ثبت شده‌اند، مناسب به‌نظر می‌رسد. اما تصادفی بودن حرکات زمین‌لرزه‌های طبیعی منجر به ماهیت غیرخطی این حرکات در سیستم ژئوتکنیکی می‌شود و لذا، با کمی تفاوت، پاسخ‌های به‌دست‌آمده از مدل ممکن است به‌طور قابل‌توجهی تغییر کنند. برای حل این مشکل می‌توان از تعداد بسیار زیادی حرکات ورودی با یک فرکانس کنترل‌کننده استفاده کرد [۹].

مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک به دو دسته تقسیم می‌گردد: مدل‌سازی $1g$ در شرایط کم‌تنش با استفاده از مخازن کوچک مقیاس و میز لرزه‌ای^۱ و مدل‌سازی ng در شرایط تنش بالا با استفاده از مخازن کالیبراسیون^۲، سانتریفوژهای ژئوتکنیکی^۳، ظرف محصورکننده‌ی مخروطی ناقص^۴ و میز لرزه‌ای سانتریفوژی^۵. در این مقاله، بررسی مختصر روش‌های گوناگون مدل‌سازی فیزیکی جهت شبیه‌سازی آزمایشات مختلف و کمک به انتخاب مدل مناسب صورت گرفته است. در این راستا، در مورد قوانین مقیاس‌گذاری، مدل‌سازی در مقیاس حقیقی، مدل‌سازی کوچک مقیاس و مدل‌سازی با سرعت‌سنجی نیز مقداری توضیح داده می‌شود.

۲- شرایط تشابه در مدل‌سازی فیزیکی

در این بخش، به بررسی شرایط مشابه بین یک مدل و نمونه‌ی اصلی آن پرداخته می‌شود. براساس تئوری تشابه^۶ مرتبط ساختن نمونه‌ی اصلی به مدل از طریق فاکتورهای مقیاس انجام می‌شود. فرض کنید یک مدل با ابعاد B و نمونه‌ی اصلی آن با ابعاد b وجود دارند. فاکتور مقیاس هندسی بین دو متغیر می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود:

¹ shaking table

² calibration chamber (CC)

³ geotechnical centrifuge

⁴ frustum confining vessels (FCV)

⁵ centrifuge shaking table

⁶ similarity theory

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

$$x^* = \frac{B}{b} = \frac{1}{n} \quad (1)$$

که n مقیاس مدل سازی است. مقیاس های دیگر مدل سازی دیگر می توانند به صورت زیر معرفی شوند:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \quad (2) \text{ مقیاس تنش}$$

$$g^* = \frac{g_M}{g_P} \quad (3) \text{ مقیاس گرانش}$$

$$\rho^* = \frac{\rho_M}{\rho_P} \quad (4) \text{ مقیاس دانسیته ی حجمی}$$

$$t^* = \frac{t_M}{t_P} \quad (5) \text{ مقیاس زمان}$$

$$u^* = \frac{u_M}{u_P} \quad (6) \text{ مقیاس جابه جایی}$$

$$\varepsilon^* = \frac{\Delta u^*}{\Delta x^*} \quad (7) \text{ مقیاس کرنش}$$

که زیوندهای M و P به ترتیب نشان دهنده ی مدل و نمونه ی اصلی هستند. شرایط تعادلی مربوط به مکانیک محیط های پیوسته برای بارگذاری استاتیکی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\sum_{j=1,3} \frac{\partial \sigma_j}{\partial x_j} + \rho \cdot g_i = 0 \quad (8)$$

که تحلیل ابعادی معادله ی فوق، برای برآورده شدن به معادله ی زیر نیاز دارد:

$$\sigma^* = x^* \cdot g^* \cdot \rho^* \quad (9)$$

معادله ی (۳) به همراه معادلات زیر، قوانین اساسی برای دستیابی به قوانین مقیاس گذاری در مدل سازی فیزیکی را ارائه می دهند:

$$f\left(\frac{\sigma^*}{x^* \cdot g^* \cdot \rho^*}, \frac{u^*}{x^*}, \frac{g^* \cdot t^{*2}}{x^*}\right) = 0 \quad (10)$$

$$g^* \cdot t^{*2} = x^* \quad (11)$$

$$u^* = x^* \quad (12)$$

در فاکتور مقیاس تنش (معادله ی (۳))، اگر ماده ی مشابه برای مدل و نمونه ی اصلی استفاده شود ($\rho^* = 1$)، سطح تنش مشابه برای حفظ رئولوژی خاک اعمال گردد ($\sigma^* = 1$) و مدل n برابر کوچک تر از نمونه ی اصلی استفاده شود، گرانش باید n برابر با توجه به شرایط شبیه سازی (معادله ی (۳)) افزایش یابد. در این مورد، مقیاس گرانشی برای مدل باید n برابر بالاتر باشد [۱۰]:

$$g^* = \frac{1}{x^*} = n \quad (13)$$

$$t^* = \frac{1}{n} \quad (14)$$

در مدل کوچک مقیاس که به لحاظ هندسی با نمونه اصلی مشابه است، نقاط هومولوگ در معرض با تنش ها و کرنش های یکسانی قرار می گیرند. بنابراین، این مدل ها می توانند وابستگی تنش و کرنش به مشخصات خاک را دربرگیرند و به طور مناسب برهم کنش سازه-خاک را شرح دهند [۱۰].

وقتی آزمایشات در مدل های کوچک با شتاب گرانشی $1g$ انجام می شوند، شرایط شبیه سازی دقیق عملی نمی شود و برخی تحلیل های دقیق اضافی در مورد تأثیر اندازه و اثرات مقیاس باید برای مدل های اعمال شده به کار گرفته شوند. اگر در توده ی



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

خاک، تغییر شکلی ظاهر شود یا یک نوار برشی در فصل مشترک خاک-سازه ایجاد گردد، امکان خطا در شرایط شبیه‌سازی افزایش می‌یابد [۱۱].

برای مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس، طول به‌عنوان مرجع انتخاب می‌شود و لذا داریم [۱۰]:

$$l^* = \frac{l_M}{l_p} = \frac{1}{n} \quad (۱۵) \text{ مقیاس طولی}$$

فاکتورهای مقیاس هندسی، تنش مؤثر و نسبت تنش-گرادیان مؤثر باید در هنگام طراحی مدل‌های فیزیکی در نظر گرفته شوند. شرایط مرزی نیز باید در روشی مشابه با نمونه‌ی اصلی انتخاب گردند. فاکتور مقیاس اتخاذ شده باید مزایا را افزایش و میزان تأثیر بر نتایج را کاهش دهد [۵].

۳- مدل‌سازی در مقیاس حقیقی^۱

به لحاظ منطقی، چنانچه هدف از مدل‌سازی فیزیکی، عدم اطمینان از روش‌هایی است که ممکن است جزئیات یک سیستم ژئوتکنیک را ایجاد کنند، استراتژی مطلوب می‌تواند انجام مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس حقیقی باشد. با توجه به ماهیت متغیر و نامطمئن زمین به دلیل تغییرپذیری ذاتی خاک ناشی از فرایندهای ژئولوژیکی طبیعی، اطلاعات ارزشمندی از انجام آزمایشات در مقیاس حقیقی که خاک‌های واقعی را تحت شرایط بارگذاری واقعی بارگذاری خواهند کرد، به دست می‌آید. آزمایش در مقیاس حقیقی معمولاً به منظور ارزیابی آن دسته از فرایندهای ژئوتکنیکی انجام می‌شوند که ممکن است آن‌قدر به جزئیات بافت و ساختار خاک واقعی وابسته باشند که استفاده از خاک‌های واقعی با همان شرایط موجود در طبیعت را الزام‌آور سازند. خاکریزهای آزمایشی مثالی بارز در این زمینه هستند. معمولاً فرایندهای بهسازی زمین نیاز به ارزیابی دارند و برای مثال، استفاده از انواع متفاوت و فواصل زهکشی^۲ برای تسریع روند تثبیت زمین نرم ممکن است مورد مطالعه قرار گیرد [۱]. از سوی دیگر، پاسخ شمع‌ها^۳ به بارگذاری با توجه به روش‌های نصب یا ساخت به کار گرفته شده تغییر می‌کند و لذا، هنوز عدم قطعیت‌هایی در تعیین ظرفیت بارگذاری و برهم‌کنش شمع-زمین وجود دارد که امکان رفع آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس حقیقی وجود دارد [۱، ۱۲].

مزیت اصلی مدل‌سازی در ابعاد حقیقی، کار با شرایط زمین واقعی، خاک‌های واقعی، بارگذاری‌های واقعی، سطوح تنش واقعی و سابقه‌های تنش واقعی است که باید در تمام مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی مدنظر قرار بگیرند که شالوده را برای ایجاد مدل‌های تئوری دقیق فراهم می‌سازد. اما مدل‌سازی در مقیاس حقیقی نیاز به صرف وقت و هزینه‌ی زیادی دارد [۱، ۱۳].

۴- مدل‌سازی کوچک مقیاس^۴

در مدل‌های کوچک مقیاس، برون‌یابی رفتار مشاهده شده در مقیاس کوچک به رفتار موردانتظار در مقیاس نمونه‌ی اصلی بسیار مهم است و بنابراین، وجود مدل‌های تئوری پشتیبان برای تفسیر مدل‌های کوچک مقیاس و از سوی دیگر، درک قوانین مقیاس‌دهی مرتبط و تحلیل ابعادی که آن‌ها را کنترل می‌کند، ضروری است. مدل‌سازی در مقیاس کوچک، انجام آزمایش‌های بیشتر در زمان کمتر و با هزینه‌ی کمتر و بررسی متغیرهای بیشتر را امکان‌پذیر می‌سازد [۱]. مدل‌های کوچک مقیاس می‌توانند در معرض با آزمایشات پیچیده از جمله نیروهای حلقوی، دینامیک یا لرزه‌ای قرار بگیرند [۱۴]. رفتار خاک در ارتباط با هر دو سطوح تنش و کرنش، به میزان زیادی غیرخطی است. این بدان معنی است که سطح تنش و کرنش در مدل کوچک مقیاس و سازه‌ی نمونه‌ی اصلی حفظ می‌شود. این سطح تنش به‌طور قابل توجهی برای سازه‌های متفاوت تغییر می‌کند [۱۵].

¹ full-scale modeling

² drain

³ piles

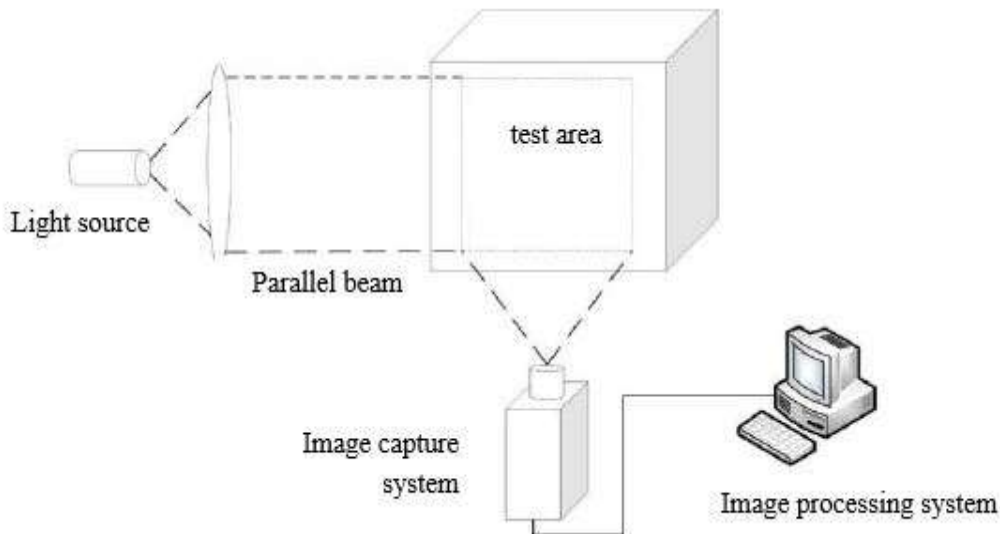
⁴ small-scale modeling

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در مدل‌های کوچک مقیاس معمولاً ارتباط تنش- کرنش برای مرتبط ساختن نتایج به سازه‌های با ابعاد حقیقی نادرست است [۱۰].

۵- سرعت‌سنجی با تصویربرداری از ذرات^۱

PIV، یک روش جایگزین برای اندازه‌گیری تغییرشکل خاک و بررسی سیستم‌های خاک-سازه از طریق مجموعه‌ای از تصاویر گرفته‌شده به‌طور دیجیتالی و ادغام آن با ویژگی‌های غیرتماسی، تمام‌زمینه و فوری می‌باشد. از آنجایی که تغییرشکل خاک و حرکت ناشی از آن را می‌توان به‌عنوان یک جریان آهسته‌ی سیال در نظر گرفت، الگوریتم‌های پردازش تصویر را براساس PIV برای ردیابی حرکات کوچک خاک (در اندازه‌ی ۲-۴ mm) مورد استفاده قرار گرفتند. سیستم PIV، دارای سه بخش ذرات ردیاب، سیستم تصویربرداری و سیستم پردازش تصویر می‌باشد (شکل ۱). از PIV برای پردازش شکست شیب و بررسی تغییرشکل خاک ناشی از فرآیندهای نفوذ و یخ زدگی می‌توان استفاده کرد [۱۶].



شکل شماره (۱): نمایی از سیستم PIV [۱۶].

۶- مدل‌سازی در شرایط کم‌تنش (1g)

۶-۱- مخازن ساده

مخازن کوچک مقیاس 1g در مقایسه با مدل‌سازی سانتیفریوژی و آزمایشات میدانی نسبتاً ارزان هستند و مدل‌ها به‌آسانی با این نوع دستگاه‌ها ایجاد می‌شوند. در واقع، این مدل‌ها به بررسی سیستم‌های پیچیده در یک محیط کنترل‌شده می‌پردازند. اما چون قادر به مدل‌سازی تنش‌های درجا نیستند، نتایج نمی‌توانند به شرایط واقعی عمومیت داده شوند. علی‌رغم این محدودیت، مدل‌های 1g در تحقیقات تونل‌زنی در زمین نرم، معدن‌کاری، ژئومورفولوژی و برهم‌کنش خاک-سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵، ۱۷، ۱۸]. مدل‌های آزمایشگاهی 1g به‌طور کلی دارای سه مشخصه‌ی اصلی هستند: (۱) مدل فیزیکی، منبعی از داده‌های قابل‌اعتماد برای پشتیبانی از مدل‌سازی عددی و تحلیل برگشتی^۲ در شرایط مرزی به‌خوبی تعریف‌شده و کنترل‌شده

¹ particle image velocimetry (PIV)

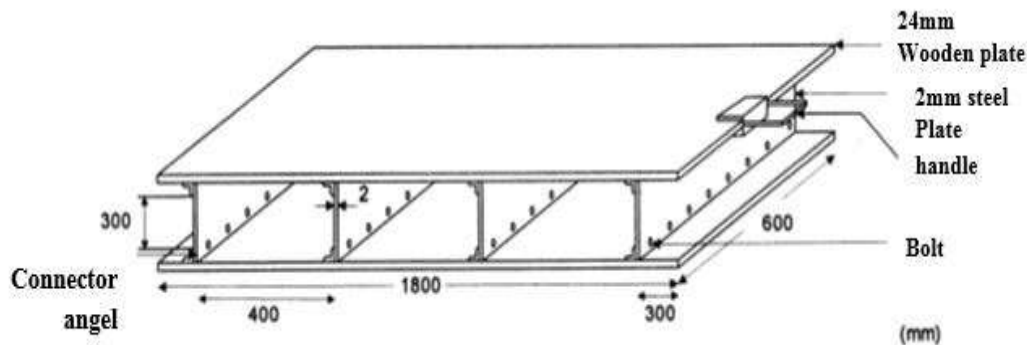
² back analysis

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

است. ۲) اندازه‌ی مدل‌ها می‌توانند بسیار بزرگ باشند، به طوری که مقیاس مدل خطی برای نمونه‌های اصلی معمولی ممکن است بسیار کوچک باشد. ۳) انطباق کامل با قوانین مقیاس‌گذاری به طور کلی غیرممکن است [۵].

۶-۲ میز لرزه‌ای ۱g

میزهای لرزه‌ای معمولاً برای بررسی اثرات بارگذاری زلزله استفاده می‌شوند [۹]. میزهای لرزه‌ای ۱g مزیت استفاده از مدل‌های با اندازه‌ی نسبتاً بزرگ در مقایسه با میزهای لرزه‌ای سانتی‌متری دارند که آن‌ها را قادر به آماده‌سازی دقیق‌تر زمین و سازه‌های مدل و از سوی دیگر، کنترل آسان ابزار اندازه‌گیری می‌نمایند. با این وجود، مقیاس‌گذاری رفتار در آزمایشات میز لرزه‌ای با توجه به تنش مدل در ۱g بسیار پایین‌تر از نمونه‌ی اصلی است. می‌توان این محدودیت تنش در مدل ۱g را با استفاده از قانون تشابه بیان‌شده توسط ایا^۱ و ایا و سوگانو^۲ برطرف کرد [۱۹]. از سوی دیگر، اگر هدف آزمایش، اعتبارسنجی مدل عددی یا درک مکانیسم‌های شکست پایه باشد، امکان استفاده از حرکات ورودی چندمحوری و اندازه‌گیری تجربی آسان‌تر وجود دارد. این روش، اطلاعات ارزشمندی را درباره‌ی مشکلات روانگرایی، نشست پس از زلزله، پاسخ پی و فشار جانبی خاک^۳ ارائه می‌دهد و با کمک آن، می‌توان رفتار انقباضی مرتبط با تنش‌های نرمال بالا در عمق‌های خاص را با قرار دادن خاک به طور بسیار آزادانه در طول آماده‌سازی مدل، شبیه‌سازی کرد. مدل ژئوتکنیکی به دلیل الزامات محصور شدن نمی‌تواند به طور مستقیم بر روی میز لرزه‌ای قرار داده شود. ظرف ایده‌آل باید بزرگ، انعطاف‌پذیر و شفاف باشد، اما دستیابی به تمام این ویژگی‌ها غیرممکن است و بهترین راه‌حل استفاده از جعبه‌های لایه‌ای^۴ برای مناسب‌سازی بهتر شرایط میدانی است [۲۰].



شکل شماره (۲): میز لرزه‌ای ۱g [۲۰].

۷- مدل‌سازی در شرایط با تنش بالا (ng)

۷-۱ مخزن کالیبراسیون^۵

CC، مثالی دیگر از ابزار تجربی بزرگ برای مدل‌سازی فیزیکی است. مخازن متعددی در ایتالیا، آمریکا، انگلستان، چین و ژاپن ساخته شده‌اند. در مورد CC، تنش با استفاده از غشاها در اطراف نمونه‌ی خاک اعمال می‌شود [۲۱]. شکل ۳ طرحی از تنظیم

¹ Iai

² Sugano

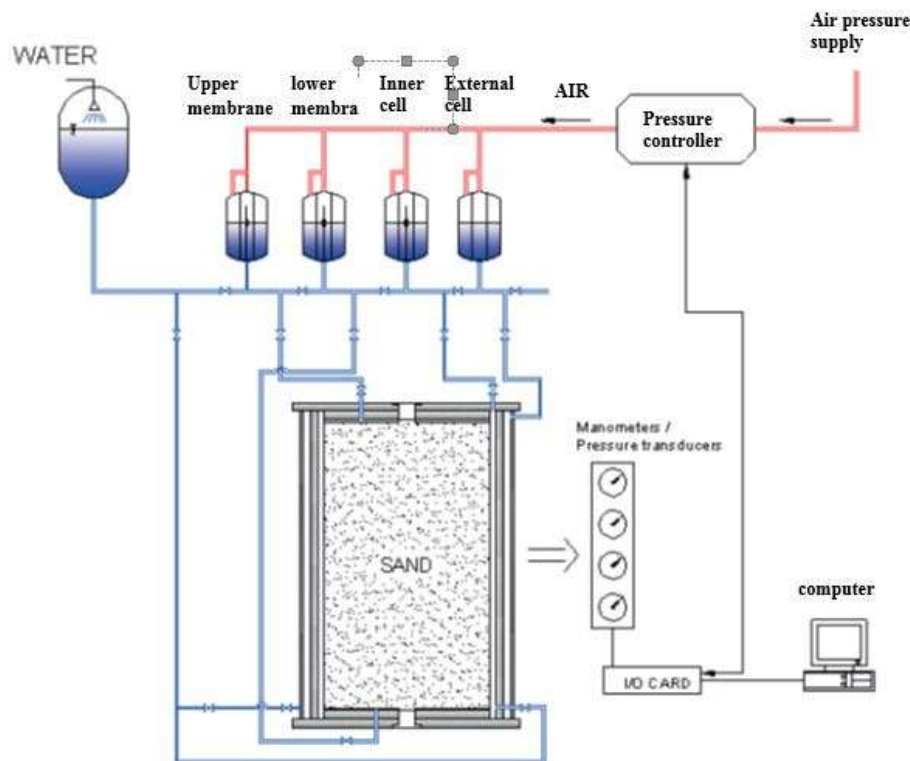
³ lateral earth pressure

⁴ laminar box

⁵ calibration chamber (CC)

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

یک CC با اندازه‌ی متوسط را نشان می‌دهد که دارای طراحی خودواکنش دهنده و قادر به اعمال شرایط مرزی پیچیده با سیستم کنترل پنوماتیکی است [۲۲]. کاربرد اصلی CC، تأیید پاسخ آزمایش درجا، در شرایط به‌خوبی تعریف‌شده‌ی خاک، سطح تنش اعمال‌شده و شرایط مرزی می‌باشد. برخی از ارتباطات موضعی در مورد تفسیر آزمایشات درجا شامل اثر کانی-شناسی خاک، تراکم‌پذیری، دانسیته و سطح تنش ایجاد شده‌اند. ارتباط بین نتایج CPT و داده‌های تجربی اغلب در CC ایجاد می‌شوند که در آن‌ها وضعیت و خواص خاک می‌توانند به‌طور دقیق کنترل گردند [۲۳]. از کاربردهای دیگر CC می‌توان از تحلیل رفتار شمع، اثرات نصب و آزمایشات بارگذاری صفحه نام برد [۱۱]. بلاچوسکی^۱ براساس مجموعه‌ای از آزمایشات مدل‌سازی CC و بررسی‌های درجا در نهشته‌ی ماسه‌ها در دریای بالتیک، یک ارتباط موضعی برای تفسیر آزمایشات CPTU در ماسه‌های کوارتز دریای بالتیک، پیشنهاد کرده است [۲۴]. گرچه CCها کم‌هزینه‌تر از سانتریفوژها هستند و می‌توانند سطوح تنش بالا را در خاک ایجاد کنند، اما تنها برای مدل‌سازی المان‌های ژئوتکنیکی در عمقی خاص مناسب می‌باشند، زیرا در آن‌ها گرادیان‌های تنش در سرتاسر نمونه‌های خاک یکسان هستند و به عبارت دیگر، این مخازن قابلیت دستیابی به توزیع تنش خطی ندارند [۲۵، ۱۸].



شکل شماره (۳) : CC با سیستم کنترل [۲۲].

با توجه به صرف هزینه و زمان زیاد در CC، ایده‌ی تکمیل آزمایشات فیزیکی با معادل‌های مجازی بسیار جذاب است و برای مدتی توسط هولسی^۲ و هیتچمن^۳ مورد توجه قرار گرفت [۲۶]. اگر تست‌های مجازی بر روی مدل‌های عددی CC قابل اجرا باشند، امکان گسترش، برون‌یابی و در برخی موارد، جایگزینی مجموعه‌هایی از آزمایشات فیزیکی را فراهم می‌کنند. برای

¹ Bałachowsk

² Houlsby

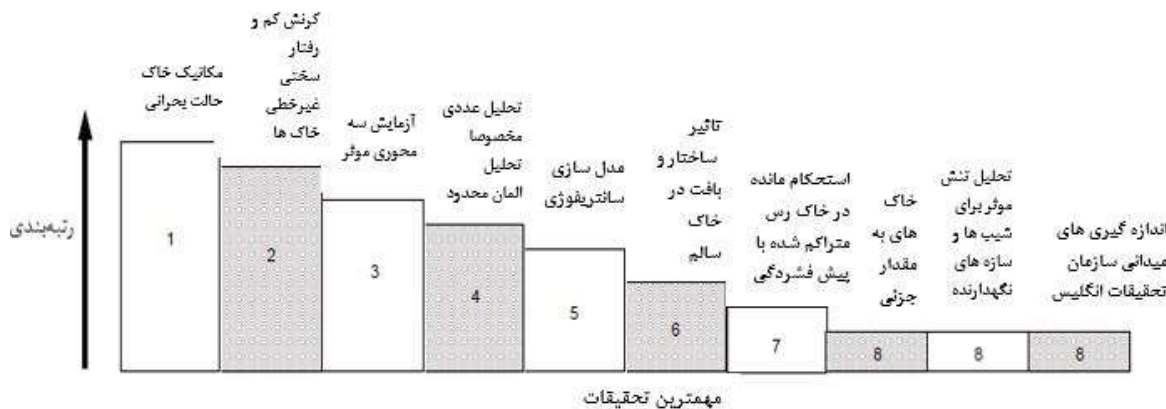
³ Hitchman

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

دستیابی به آزمایشات مجازی معنی دار باید اثبات شود که مخزن کالیبراسیون مجازی^۱ قادر به بازتولید کمی نتایج به دست آمده در آزمایشات فیزیکی معادل می باشد و همچنین، باید روشی واضح برای ساخت VCC ارائه گردد. مدل های عددی به-دست آمده اجازه می دهند پارامترهای داخلی که اندازه گیری در جای آنها مشکل است، تحت نظارت قرار بگیرند [۲۷].

۲-۷ مدل سازی سانتریفوژی

مدل سازی سانتریفوژی ژئوتکنیکی، یک رویکرد مدل سازی فیزیکی پیشرفته برای شبیه سازی و مطالعه ی مشکلات ژئوتکنیکی است [۲۸]. اولین سانتریفوژ ژئوتکنیکی برای اهداف نظامی در URRS سابق ساخته شد [۲۹]. نقش مدل سازی سانتریفوژی در مقاوم سازی لرزه ای تونل جرج مسی^۲ کاملاً برجسته است [۳]. این روش، داده های فیزیکی را برای بررسی مکانیسم های تغییر شکل و شکست و به منظور اعتبارسنجی روش های عددی و تحلیلی فراهم می کند. مدل سازی سانتریفوژی مزایایی مانند قابل اطمینان بودن و صرفه جویی در زمان و هزینه دارد که به آن نسبت به روش تجربی برتری می دهد [۲۸]. در مدل سازی سانتریفوژی، مشخصات خاک و شرایط مرزی می توانند کنترل شوند و عملکرد ساختاری می تواند به طور گسترده ای تحت نظارت قرار بگیرد [۳۰]. مزیت عمده ی مدل سازی سانتریفوژی، امکان بازتولید میدان های تنش گوناگون می باشد که مشابه با آنچه که در واقعیت اتفاق می افتد، هستند [۱۳]. طبق بررسی انجام شده توسط انجمن ژئوتکنیک انگلیس در سال ۱۹۹۹، مدل سازی سانتریفوژی در رتبه ی پنجم لیست مهمترین تحولات ژئوتکنیک در طی ۵۰ سال گذشته قرار گرفته است و لذا نقشی کلیدی را در مهندسی ژئوتکنیک ایفا می کند (شکل ۴) [۲۸].



شکل شماره (۴) : مهم ترین تحولات ژئوتکنیک در طول ۵۰ سال گذشته [۲۸].

در آزمایشات مدل سانتریفوژی، افزایش سطح تنش با استفاده از پرواز ظرف خاک در یک صفحه ی افقی با سرعت شعاعی ثابت تحقق می یابد. فاکتورهای مقیاس برای تفسیر آزمایشات سانتریفوژی در جدول ۱ خلاصه می شوند [۱۰].

جدول شماره (۱) : فاکتورهای مقیاس در آزمایشات مدل سازی سانتریفوژی [۱۰].

پارامتر	قانون مقیاس گذاری نمونه ی اصلی /مدل (model/prototype)
طول	1/n

¹ virtual calibration chamber (VCC)

² George Massey

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

سطح	$1/n^2$
حجم	$1/n^3$
جرم (mass)	$1/n^3$
وزن خاص (حجم/نیرو)	n
زمان	$1/n$
گرانش	n
تنش	1
کرنش	1
جابه‌جایی	$1/n$
نیرو (استاتیک)	$1/n^2$
دانسیته	1

انواع کارهایی که می‌توان با مدل‌سازی سانتریفوژی انجام داد، عبارتند از: تشکیل شیب‌های بریده، ایجاد خاکریزها، نصب و بارگذاری پی‌های کم‌عمق و عمیق، ساخت سازه‌های نگهدارنده، تشکیل تونل‌ها، بررسی شمع‌ها و غیره [۱]. سانتریفوژها در مقایسه با آزمایشات مدل‌سازی در مقیاس حقیقی کم‌هزینه‌تر هستند و به‌خوبی قادر به مدل‌سازی گرادین‌های تنش می‌باشند، با این وجود، معایبی شبیه به هزینه‌ی بالا و مشکلات مدل‌سازی مربوط به چرخش دستگاه و محدودیت دسترسی را به همراه دارند [۲۵].

سانتریفوژهای ژئوتکنیکی به‌طور موفقیت‌آمیزی برای ارزیابی تجربی جنبه‌های متفاوت برهمکنش خاک-پی-سازه مورد استفاده قرار گرفتند [۳۲-۳۴]. از سوی دیگر، با توجه به مزایای مدل‌سازی سانتریفوژی، از این روش برای مدل‌سازی ناهمگونی خاک^۱ در مقیاس بزرگ به‌منظور مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ای و مکانیسم روانگرایی ماسه‌ای ناهمگن استفاده شد [۳۵]. نمایی از سانتریفوژ شعاعی مورد استفاده در آزمایشگاه‌های Ifsttar که برای مدل‌سازی در مهندسی دریایی به‌کار می‌رود، در شکل ۵ نشان داده شده است [۳۶].



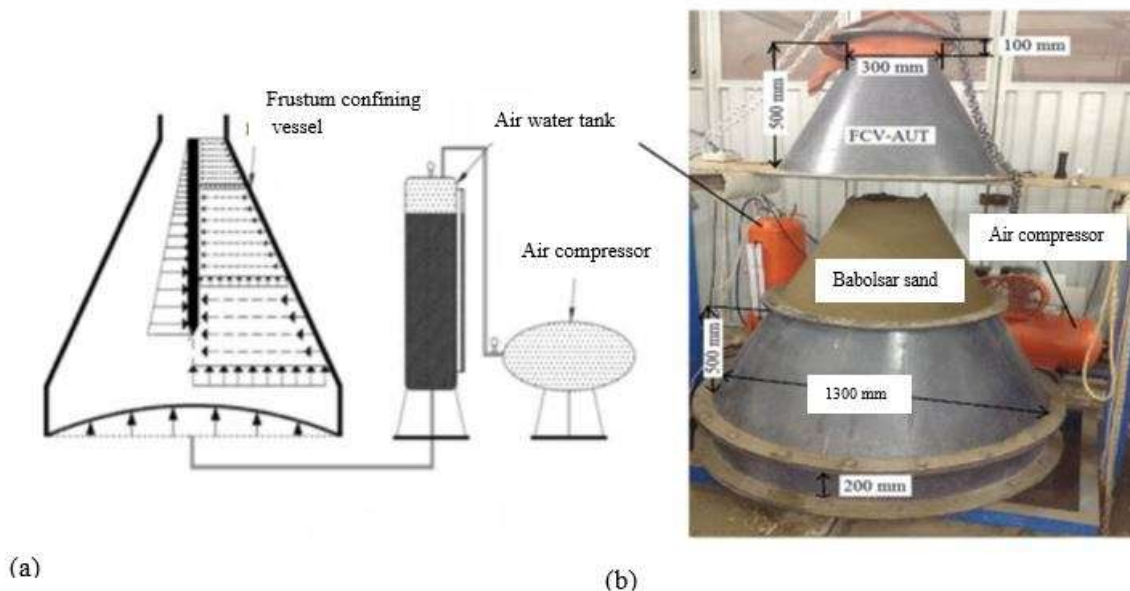
شکل شماره (۵) : نمایی از سانتریفوژ ژئوتکنیکی [۳۶].

¹ soil heterogeneity

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۳-۷ ظرف محصورکننده‌ی مخروطی ناقص^۱

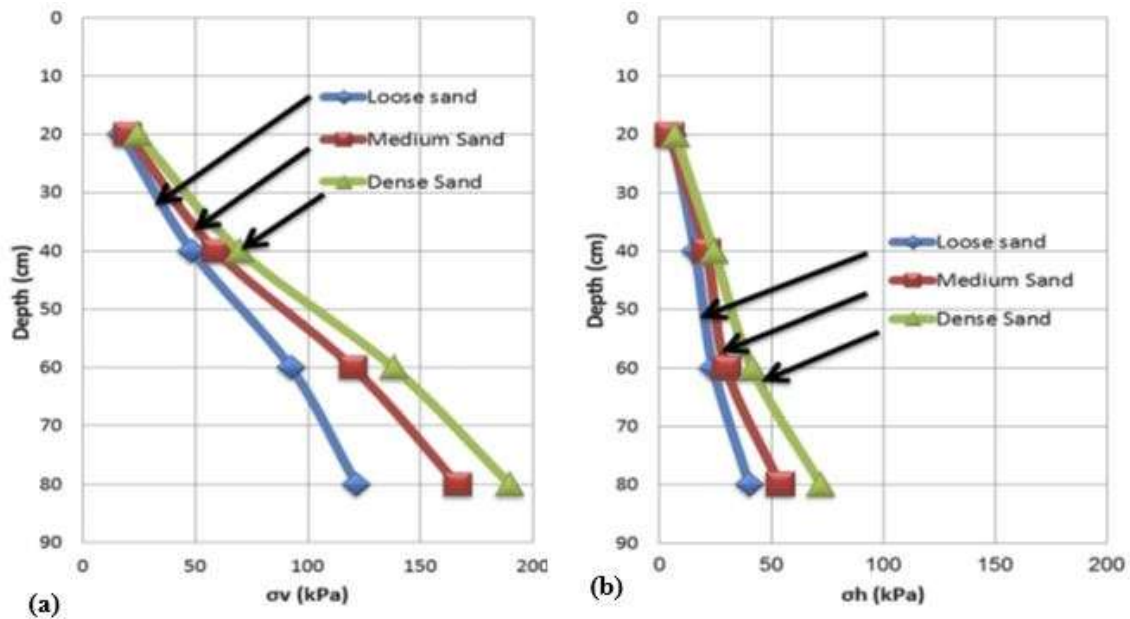
FCV، دستگاهی نسبتاً جدید برای مدل‌سازی فیزیکی در شرایط تنش واقعی و فشار زیاد مشابه با موقعیت‌های میدانی است. این دستگاه، مزایای سانتریفوژها و مخازن کالیبراسیون را ادغام می‌کند و به شکل مخروطی کوتاه‌شده است که فشاری پایا را به پایین آن وارد می‌کند که همین امر امکان شبیه‌سازی تنش و فشار واقعی را در آن فراهم می‌آورد. در واقع، این دستگاه قادر به توزیع تنش افقی و عمودی در عمق است. این تنش‌ها در بالای ظرف صفر است و با افزایش عمق به مقدار تنش که در پایین دستگاه با استفاده از سیستم فشار هیدرولیک اعمال می‌شود، افزوده می‌گردد. در مقایسه با سانتریفوژها، FCV بسیار ارزان‌تر است و از سوی دیگر، تنش در آن متناسب با فشار پایه‌ی اعمال‌شده است که بدین معنی است که با افزایش فشار پایه می‌توان تنش بالای اعمال‌شده در عمق ۳۰-۴۰ m خاک را ایجاد کرد. به علاوه، ابعاد آن در مقایسه با سانتریفوژها بزرگتر است که امکان مدل‌سازی المان‌های بزرگتر و کاهش خطاهای ناشی از اثرات مقیاس‌بندی را فراهم می‌کند [۲۵، ۱۸، ۳۷]. فاکتورهای مقیاس‌گذاری FCV می‌توانند با استفاده از تئوری‌های تشابه بسته به میزان تحت فشار بودن خاک تعیین شوند [۳۸]. شکل-های ۶ و ۷ به ترتیب نمایی از FCV-AUT و توزیع تنش‌های افقی و عمودی در برابر عمق در FCV-AUT را نشان می‌دهند [۱۸].



شکل شماره (۶): (a) دیاگرام شماتیک FCV-AUT و تجهیزات آن، (b) عکس آن [۱۸].

^۱ Frustum Confining Vessel (FCV)

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل شماره (۷): (a) توزیع تنش عمودی در برابر عمق و (b) توزیع تنش افقی در برابر عمق در FCV-AUT [۱۸].

از آنجایی که کاربرد FCV در سرتاسر جهان محدود است، فقدان داده‌های کافی به دست آمده از مطالعات شامل FCV ممکن است به عنوان یک نقص مورد توجه قرار گیرد، چرا که امکان مقایسه‌ی داده‌ها با یکدیگر وجود ندارد [۲۵]. اولین دستگاه FCV در دانشگاه مک مستر ساخته شد و آزمایش چندین مدل شمع با نسبت تخلخل^۱ و فشارهای پایه‌ی گوناگون نشان داد که یک توزیع تنش خطی با عمق در FCV وجود دارد. دستگاه دوم در سال ۱۹۹۹ در دانشگاه فلوریدای جنوبی توسط مولینز^۲ و همکارانش ساخته شد. از دستگاه FCV با ارتفاع ۱۳۷۲ mm که نسبت به دستگاه دانشگاه مک مستر ارتفاع بیشتری دارد، برای انجام آزمایشات استاتنامیک^۳ در شمع‌های کوچک مقیاس استفاده شد. ارتفاع بیشتر سبب کاهش اثرات مقیاس گذاری شده است [۳۹]. نسلی دیگر از دستگاه‌های FCV با نام FCV-AUT در سال ۲۰۱۲ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به ترتیب با ارتفاع، قطر بالایی و قطر پایینی ۱۳۰۰ mm، ۳۰۰ mm و ۱۳۰۰ mm ساخته شد. چندین مطالعه با استفاده از FCV-ATU به منظور بررسی عملکرد شمع‌های بارگذاری شده به طور محوری صورت گرفته است [۴۰، ۴۱].

۴-۷ میز لرزه‌ای سانتریفوژی

آزمایشات میز لرزه‌ای سانتریفوژی برای بررسی پاسخ لرزه‌ای انواعی از سیستم‌های خاک-سازه استفاده شده‌اند. مدل سازی میز لرزه‌ای سانتریفوژی، ابزاری ارزشمند برای ادغام مدل سازی فیزیکی مرسوم با تکرار تنش درجا می‌باشد. این روش در مقیاسه با آزمایشات ابعاد حقیقی نیاز به صرف زمان و هزینه‌ی کمتری دارد و از سوی دیگر، نسبت به میز لرزه‌ای ۱g دقت بیشتر و شرایط تنش واقعی تری را ارائه می‌کند. به علاوه، مدل سازی میز لرزه‌ای سانتریفوژی، برای تأیید شبیه سازی‌های عددی مفید است و قادر به کاربرد کامل ویژگی‌های تغییر شکل یا استحکام خاک مورد بررسی می‌باشد. می توان یک میز لرزه‌ای سانتریفوژی بزرگ مقیاس ساخته شده در کره را در شکل ۸ مشاهده کرد [۴۲].

¹ void ratio

² Mullins

³ statnamic

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل شماره (۸) : میز لرزه‌ای سانتریفوژی ساخته شده در کره [۴۲].

مدل‌های میز لرزه‌ای سانتریفوژی به مرزهای محدود ارائه شده توسط ظرف مدل محدود می‌شوند. این مرزهای مصنوعی ممکن است تنش و کرنش در شرایط واقعی را محدود کنند و منجر به ایجاد امواج P به عنوان امواج موج زائد در مدل شوند که در نمونه‌ی اصلی وجود ندارند. شرایط مرزی واقعی‌تر در مرز مدل، شبیه‌سازی‌های مدل دقیقی از رفتار لرزه‌ای خاک ایجاد می‌کنند که رفتار مشاهده شده در لایه‌های خاک نیمه محدود در شرایط واقعی را منعکس می‌نمایند. ظرف با دیوارهای صلب، ظرف تیر برشی معادل^۱ و ظرف لایه‌ای برای آزمایشات میز لرزه‌ای سانتریفوژی استفاده می‌شوند [۴۳].

۸- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی فیزیکی، روشی مؤثر برای ایجاد ارتباط بین مدل‌سازی عددی و داده‌های تجربی می‌باشد و سبب افزایش اعتبار پیش‌بینی‌های موردنظر در مورد رفتار موردانتظار از نمونه‌ی اصلی می‌گردد. با توجه به هدف مطالعه و مشخصات نمونه‌ی اصلی، مدل فیزیکی مناسب انتخاب و طراحی می‌گردد. امکان مدل‌سازی در مقیاس‌های حقیقی و کوچک وجود دارد. مدل‌سازی سانتریفوژی در مقایسه با مدل‌های مقیاس حقیقی ارزان‌تر هستند و قادر به مدل‌سازی گرادیان‌های تنش می‌باشند، اما هزینه‌ی بالا و محدودیت دسترسی دارد.

CC ها کم‌هزینه‌تر از سانتریفوژها هستند و می‌توانند سطوح تنش بالا را در خاک ایجاد کنند، اما تنها برای مدل‌سازی المان-های ژئوتکنیکی در عمقی خاص مناسب می‌باشند، زیرا این مخازن قابلیت دستیابی به توزیع تنش خطی را ندارند. در مقایسه با سانتریفوژها، FCV بسیار ارزان‌تر است و در آن با افزایش فشار پایه می‌توان تنش بالای اعمال شده در عمق ۳۰-۴۰ m خاک را ایجاد کرد. اما دسترسی به آن بسیار محدود است. میز لرزه‌ای سانتریفوژی نسبت به میز لرزه‌ای ۱g دقت بیشتر و شرایط تنش واقعی‌تری را ارائه می‌کند. مخازن کوچک مقیاس ۱g نسبت به مدل‌سازی سانتریفوژی و آزمایشات میدانی ارزان هستند و مدل‌ها به‌آسانی با این نوع دستگاه‌ها ایجاد می‌شوند، اما چون قادر به مدل‌سازی تنش‌های درجا نیستند، نتایج نمی‌توانند به شرایط واقعی عمومیت داده شوند.

¹ equivalent shear beam container



مراجع

1. Wood, D. M., 2003. Geotechnical modeling. (Vol. 1). CRC press
2. Bhattacharya, S., Demirci, H. E., Nikitas, G., Prakhya, G. K. V., Lombardi, D., Alexander, N. A., Aleem, M., Amani, S. and Mylonakis, G., 2021. Physics modeling of interaction problems in geotechnical engineering. In *Modeling in Geotechnical Engineering* (pp. 205-256). Academic Press.
3. Wartman, J., 2006. Geotechnical physical modeling for education: Learning theory approach. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 132(4), pp. 288-296.
4. Phillips, R., Guo, P. and Popescu, R., 2002. Physical Modelling in Geotechnics, ICPMG'02,,: Proceedings of the International Conference on Physical Modelling in Geotechnics/ ICPGM'02, St. John's, New Foundland, Canada, 10-12 July 2002, Balkema.
5. Al Heib, M., Emeriault, F. and Nghiem, H. L., 2020. On the use of 1g physical models for ground movements and soil-structure interaction problems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), pp. 197-211.
6. Tsuha, C. D. H. C., Aoki, N., Rault, G., Thorel, L. and Granier, J., 2012. Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests. *Canadian Geotechnical Journal*. 49(9), pp. 1102-1114.
7. Fioravante, V., 2011. Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer. *Géotechnique*, 61(2), pp. 121-132.
8. Le Kouby, A., Dupla, J. C., Canou, J. and Francis, R., 2016. The effects of installation order on the response of a pile group in silica sand. *Soils and Foundations*, 56(2), pp. 174-188.
9. Wood, D. M., Crewe, A. and Taylor, C., 2002. Shaking table testing in geotechnical models. *International Journal of Physical modeling in Geotechnics*, 2(1), pp. 01-13.
10. Konkol, J., 2014. Derivation of the scaling laws used in geotechnical centrifuge modeling-application of dimensional analysis and Buckingham II theorem. *Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn*.
11. Foray, P., Balachowski, L. and Rault, G., 1998. Scale effect in shaft friction due to the localization of deformations. In *Centrifuge 98*, pp. 211-216.
12. Basu, P., Prezzi, M. and Basu, D., 2010. Drilled displacement piles – current practice and design. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 4(1), pp. 3-20.
13. Garzón, L. X., Caicedo, B., Sánchez-Silva, M. and Phoon, K. K., 2015. Physical modelling of soil uncertainty. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 15(1), pp. 19-34.
14. Falborski, T., and Jankowski, R., 2013. Polymeric bearings-a new base isolation system to reduce structural damage during earthquakes. In *Kay Engineering Materials* (Vol. 569, pp. 143-150). Trans Tech Publications Ltd.
15. Hazarica, H., Kohama, E. and Sugano, T., 2008. Underwater shake table tests on waterfront structures protected with tire chips cushion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(12), pp. 1706-1719.
16. Duan, X. F., Wang, Y. Z., and Yuan, X. M., 2018. State-of-the-art review of particle image velocimetry (PVI) in Geotechnical Engineering. *DES tech Transactions on Computer Science and Engineering*.
17. Meguid, M. A., Saada, O., Nunes, M. A. and Matter, J., 2008. Physical modeling of tunnels in soft ground: a review. *Tunneling and Underground Space Technology*, 23(2), pp. 185-198.
18. Zarrabi, M. and Eslami, A., 2016. Behavior of piles under different installation effects by physical modeling. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), p. 04016014.
19. Yang, E. K., Choi, J. I., Kwon, S. Y. and Kim, M. M., 2011. Development of dynamic py backbone curves for a single pile in dense sand by 1g shaking table tests. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(5), p. 813.
20. Prasad, S. K., Towhata, I., Chandradhara, G. P. and Nanjundaswamy, P., 2004. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering. *Current Science*, pp. 1398-1404.
21. Ghionna, V. N. and Jamiolkowski, M., 1991, June. A critical appraisal of calibration chamber testing of sands. In *Proc., 1st Int. Symp. On Calibration Chamber Testing*. pp. 13-39.
22. Bałachowski, L. 2008. Physical modeling in sands in a wide range of stress level: Application to the calibration of CPTU and DMT tests. *Gdańska University of Technology*.
23. Huang, A. B., and Hsu, H. H., 2004. Advanced calibration chambers for cone penetration testing in cohesionless soil. In *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Vols. 1 and 2, pp. 147-166.
24. Bałachowski, L., 2006. Penetration resistance of Lubiatowo sand in calibration chamber tests. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 53(4), pp. 311-329.



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

25. Zar, M. and Eslami, A., 2014. Study of deep foundation performances by frustum vessel (FCV). *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), pp. 271-280.
26. Houlby, G. T. and Hitchman, R., 1989. Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand . Discussion. *Géotechnique*, 39 (4).
27. Arroyo, M., Butlanska, J., Gens, A., Calvetti, F. and Jamiolkowski, M., 2011. Cone penetration tests in avirtual calibration chamber. *Géotechnique*, 61(6), pp. 525-531.
28. Ng, C. W., 2014. The state-of-the-art centrifuge modeling of geotechnical problems at HKUST. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 15(1). pp. 1-21.
29. Madabhushi, G., 2014. Centrifuge modeling for civil engineers. CRC press.
30. Andersen, K. H., Jeanjean, P., Luger, D. and Jostad, H. P., 2003. Centrifuge tests on installation of suction anchors in soft clay. In *Deepwater Mooring Systems: Concepts, Design, Analysis, and Materials* (pp. 13-27).
31. Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., Konig, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M. F. and Thorel, L., 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modeling. *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, 7(3), pp. 01-23.
32. Borghei, A. and Ghayoomi, M., 2018. Centrifuge modeling to evaluate kinematic soil-foundation-structure interaction. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Structure Interaction*, pp. 321-329. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
33. Borghei, A. and Ghayoomi, M., 2019. The role of kinematic interaction on measured seismic response of soil-foundation-structure systems. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 125, p.105674.
34. Mason, H. B., Trombetta, N. W., Chen, Z., Bray, J. D., Hutchinson, T. C. and Kutter, B. L., 2013. Seismic soil-foundation-structure interaction observed in geotechnical centrifuge experiments. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 48, pp.162-174.
35. Chakraborty, P., Popescu, R. and Phillips, R. 2011, Liquefaction Study of Heterogeneous Sand: Centrifuge. *Geotechnical Testing Journal*, 34(3), p.1.
36. <http://eurofuge2016.ifsttar.fr>
37. Khazaei, J. and Eslami, A., 2016. Geotechnical behavior of helical piles via physical modeling by Frustum Confining Vessel (FCV). *International Journal of Geography and Geology*, 5(9), pp. 167-181.
38. Serdan, G., 1999. Experimental and analytical study of a frustum confining vessel. A Thesis submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, McMaster University, Canada.
39. Mortazavi Bak, H., Halabian, A. M. and Hashemolhosseini, S. H., 2020. Optimization of frustum confining vessels using various boundary and interface conditions. *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, pp. 1-18.
40. Fateh, A. M. A., Eslami, A. and Fahimifar, A., 2017. Study of soil disturbance effect of bearing capacity of helical pile by experimental modeling in FCV. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(3), pp. 289-301.
41. Mohammadi, A., Ebadi, T., Eslami, A. and Van Der Zee, S. E., 2019. Axial compressive bearing capacity of piles in oil-contaminated sandy soil using FCV. *Marine Georesources and Geotechnology*, 37(2), pp. 164-179.
42. Kim, D. S., Kim, N. R., Choo, Y. W. and Cho, G. C., 2013. A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(1), pp. 77-84.
43. Lee, C.J., Wei, Y. C. and Kue, Y. C., 2012. Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1), pp. 37-51.