



ارزشیابی مدل‌های رفتاری خاک در دیوار میخکوبی شده با استفاده از مدل سانتریفیوژ

فریدون خسروی^{۱*}، سید رسول سورانی^۲، فراز آهی مقدم^۲

^۱ دانشکده عمران، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

^۲ دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۲۸

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۲۱

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۲۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۰۳

کلمات کلیدی:

گودبرداری

مدل رفتاری خاک

تغییر شکل دیواره

سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

روش اجزاء محدود

خلاصه: از جمله مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک، پایداری دیواره‌های گودبرداری و کنترل تغییر شکل‌های مرتبط با آن است. استفاده از روش‌های اجزای محدود ایده‌ای مناسب برای مدل‌سازی گودبرداری‌ها می‌باشد و در این میان، انتخاب مدل رفتاری مناسب، نقش مهمی در صحت نتایج مربوطه ایفا می‌کند. جدال بین سادگی و دقت، مسئله‌ی مهمی است که همواره در انتخاب مدل رفتاری مناسب وجود دارد. دقت هر یک از مدل‌های رفتاری خاک را می‌توان با استفاده از مدل‌سازی‌های فیزیکی که ابزار قدرتمندی در ژئوتکنیک است، صحت‌سنجی نمود. در این مقاله با استفاده از ۴ مدل سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، تأثیر فاصله سر بار از لبه گود بر روی تغییر شکل دیواره‌ی گود بررسی شده است. همچنین با مدل‌سازی گود در نرم‌افزار اجزای محدود و استفاده از مدل رفتاری‌های مختلف در تحلیل آن، نتایج بدست آمده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی دیواره‌ی میخکوبی شده با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج مدل‌های سانتریفیوژ نشان دادند که فاصله سر بار از لبه ی گود در میزان و الگوی تغییر شکل دیواره بسیار تعیین‌کننده می‌باشد و با افزایش فاصله سر بار از لبه ی گود بیشترین مقدار تغییر شکل افقی دیواره‌ی گود به سمت کف گود میل می‌کند، در صورتی که بر اساس حل عددی فارغ از فاصله سر بار از لبه گود، این تغییر شکل همواره در تاج گود اتفاق می‌افتد. همچنین برای پیش‌بینی تغییر شکل قائم تاج گود بر اساس مقایسه ی نتایج مدل‌های سانتریفیوژ و نتایج بدست آمده از مدل‌های رفتاری مختلف، بیشترین تطابق در مدل رفتاری خاک سخت شونده با کرنش کوچک مشهود است.

۱- مقدمه

سازه شده و یا حتی موجب خرابی و فروریزش قسمتی از سازه شوند. این موضوع مخصوصاً در مناطق شهری و مسکونی که ساختمان‌ها ارتفاع و وزن زیادی دارند و عمق گودبرداری‌ها زیاد است اهمیت بسیاری می‌یابد [۲].

برای کاهش میزان خسارت‌های وارده بر ساختمان‌های مجاور گودبرداری، پیش‌بینی تغییرات ایجاد شده در زمین و دیواره گودبرداری ضروری می‌باشد و برای این کار می‌توان از روش‌های تجربی و یا تحلیل‌های عددی سود برد [۳]. استفاده از روش‌های عددی با توجه پیشرفت‌های علوم رایانه‌ای، به‌عنوان یک روش سریع و کم‌هزینه در حل مسائل ژئوتکنیکی مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر با افزایش عمق گودبرداری و تعدد آن در مناطق شهری، مقدار و وسعت نشست زمین مجاور محل گودبرداری افزایش یافته است و مکرراً باعث آسیب رسیدن به سازه‌های مجاور می‌شود [۱]. هنگام گودبرداری، خاک پشت دیواره گود مقداری حرکت افقی و قائم خواهد داشت. این جابه جایی خاک موجب نشست ناهمگون در پی مجاور گود می‌شود. تغییر مکان و تغییر شکل ایجاد شده در اعضای مختلف سازه باعث بروز تغییراتی در نیروهای داخلی اعضا خواهد شد. این نیروها می‌توانند موجب بروز آسیب‌های جدی در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ferydoonkhosravi@yahoo.com



آیند، اما انتخاب مناسب خواص مهندسی خاک حائز اهمیت می‌باشد [۸]. برینکگرو^۴ به بررسی انتخاب مدل رفتاری و پارامترهای خاک در کاربردهای مختلف ژئوتکنیکی پرداخته است [۹]. آبرزاد^۵ و انگ^۶ بر استفاده از مدل رفتاری خاک سخت شونده با کرنش کوچک در مسائل مختلف ژئوتکنیکی از جمله دیوار حائل در گودبرداری، تونل و باربرداری ناشی از زه کشی در مسائل مربوط به تحکیم پرداخته‌اند [۱۰]. لیم^۷ و همکاران مدل رفتاری‌های خاک رسی در تحلیل گودبرداری عمیق در شرایط زه کشی نشده را با استفاده از یک مطالعه موردی ارزیابی نمودند. مدل رفتاری‌های مورد ارزیابی در این پژوهش عبارت‌اند از: مدل کم کلی (Cam-Clay) اصلاح شده، مدل خاک سخت شونده، مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک، مدل مور کلمب با زاویه اصطکاک صفر ($\phi = 0$)، مدل خاک نرم زه کشی نشده. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش نتایج زیر بدست آمد [۱۱]:
- در مدل کم کلی اصلاح شده: جابه‌جایی دیواره و نشست زمین تخمین زده شده بوسیله‌ی پارامترهای واقعی خاک به مراتب کمتر از اندازه‌گیری‌های صحرایی است.

- در مدل سخت شونده: مقادیر تخمین زده شده‌ی جابه‌جایی دیوار در مرحله آخر عموماً نزدیک به اندازه صحرایی و در سایر مراحل بزرگ‌تر می‌باشد. این مدل در مقایسه با مدل کم کلی اصلاح شده تخمین بهتری در مورد نشست‌های سطحی می‌دهد اما همچنان دور از اندازه‌های صحرایی است.

- مدل خاک سخت شونده کرنش کوچک: همان نتایج مدل سخت شونده با اندکی بهبود در تخمین نشست سطحی را می‌دهد.

- در مدل مور کلمب با کرنش کوچک: برای بدست آوردن پارامترهای آن از آنالیز برگشتی استفاده شد، می‌تواند منجر به منطبق شدن نتایج برای مراحل میانی تا پایانی شود. با این حال، این مدل قادر به تخمین وضعیت تنش برای شرایط بارگذاری‌های مختلف نمی‌باشد.

- مدل خاک نرم زه‌کشی نشده: این مدل نتایج خوبی را هم

برای نشست سطحی و هم جابه‌جایی دیواره ارائه می‌دهد.

تئو^۸ و ونگ^۹ به بیان کاربردهای مدل خاک سخت شونده در

بالین‌حال یکی از مهم‌ترین مسائل در تحلیل‌های عددی انتخاب مجموعه‌ی معادلات ریاضی توصیف‌کننده روابط میان تنش و کرنش است، چراکه نتایج بدست آمده از حل‌های عددی مستقیماً متأثر از انتخاب این روابط می‌باشد. برای پی بردن به میزان دقت روش‌های عددی، صحت سنجی آن‌ها ضروری است. برای صحت سنجی نتایج تحلیل‌های عددی می‌توان از مدل‌سازی فیزیکی که ابزاری بسیار مهم و کارآمد در مهندسی ژئوتکنیک است، استفاده نمود. روش مدل‌سازی سانتریفیوژ به‌عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های مدل‌سازی در مسائل خاکی به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه رفتار دیوارهای میخکوبی شده مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۶].

در این مقاله پس از مروری بر منابع، مدل رفتاری‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه مشخصات مدل سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بیان شده و پس از مدل‌سازی، تأثیر انتخاب مدل‌های رفتاری مختلف در پیش‌بینی تغییرشکل دیواره‌ی میخکوبی شده و فاصله سربار از لبه گود در تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری بررسی خواهند شد.

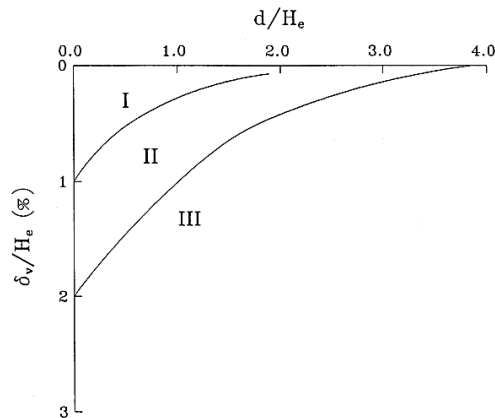
۲- مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- کارهای عددی

مطالعات فراوانی در زمینه‌ی تغییرشکل‌های خاک مجاور گود با استفاده از روش‌های عددی صورت گرفته که می‌توان به کارهای پیش‌گامانی مانا^۱ و کلوف^۲ اشاره نمود. مانا و کلوف با استفاده از نتایج مطالعات میدانی و تحلیل اجزای محدود، یک روش ساده برای تخمین جابه‌جایی خاک مجاور دیواره‌های مهارشده در خاک رس نرم تا متوسط پیشنهاد نمودند [۷]. ویتل^۳ و همکاران به تشریح استفاده از تحلیل اجزاء محدود برای مدل‌سازی ساختمانی که به روش بالا به پایین (top-down) ساخته می‌شود، پرداختند. در این پژوهش از یک الگوریتم دقیق عددی برای مدل‌سازی گودبرداری به همراه یک مدل رفتاری توسعه داده‌شده در خاک رسی استفاده شد. نتایج بدست آمده از حل عددی بوسیله‌ی برداشت‌های میدانی مورد ارزیابی و اصلاح قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بودند که پیش‌بینی‌هایی قابل قبول و سازگار از تغییرشکل خاک و جریان آب می‌تواند از روش‌های پیشرفته تجزیه تحلیل، بدون اصلاح پارامتری اندرکنش خاک و سازه به دست

1 Mana
2 Clough
3 Whittle

4 Brinkgreve
5 Obrzud
6 Eng
7 Lim
8 Teo
9 Wong



Zone I: Sand and soft to hard clay, average workmanship
 Zone II: Very soft to soft clay
 1. Limited depth of clay below bottom of excavation
 2. Significant depth of clay below bottom of excavation but $N_b < N_{cb}$
 Zone III: Very soft to soft clay to a significant depth below bottom of excavation and with $N_b > N_{cb}$
 N_b is the stability number, $N_b = \gamma H / S_u$
 N_{cb} is the critical stability number for basal heave

شکل ۱. نمودار تخمین میزان نشست خاک در اطراف محل گودبرداری بر اساس مطالعات پک [۱۹]

Fig. 1. Estimation of soil settlement around the excavation site based on Peck studies

از این مدل در مسائل حفاری موجب دستیابی به نتایج دقیق‌تر می‌گردد [۱۶]. ذوالقدر^۴ و همکاران عملکرد یک گود میخکوبی شده در تهران را مورد بررسی قرار دادند و نتایج بدست آمده از تحلیل‌های مختلف را با اندازه‌گیری‌های میدانی مورد مقایسه قرار دادند. بر همین اساس آن‌ها اظهار داشتند استفاده از مدل مور کلمب و مدل‌سازی المان‌های صفحه‌ای با یک اتصال صلب در مدل‌سازی پوسته و میخ‌ها به همراه ریزتر نمودن مش‌های اطراف میخ‌ها باعث تطابق قابل قبول تغییرشکل افقی بدست آمده از حل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده در دیواره می‌گردد [۱۷]. بهاتکار و همکاران^۵ به مطالعه رفتار یک گود عمیق به روش دیوار دیافراگمی در خاک سست به همراه یک مطالعه موردی پرداختند. بر اساس نتایج، در صورت در نظر گرفتن جزئیات ژئوتکنیکی و جنبه‌های سازه‌ای از قبیل عمق گودبرداری، نوع سیستم مهارکننده و دقت در مراحل اجرای گودبرداری، تحلیل دوبعدی المان محدود راهکاری مؤثر برای پیش‌بینی عملکرد گودبرداری عمیق می‌باشد [۱۸].

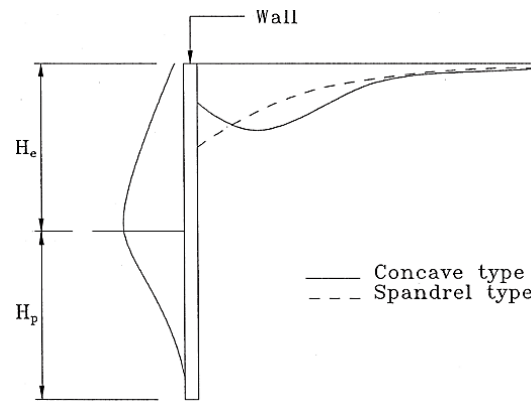
۲-۲- کارهای تجربی

نتایج برداشت‌های میدانی و مشاهدات در پروژه‌های گذشته می‌توانند راهنمایی مناسب برای ارزیابی عملکرد گودبرداری‌های مهارشده آینده باشند. پک^۶ در سال ۱۹۶۹ نشان داد که میزان نشست بعد از گودبرداری عمیق به نوع خاک وابسته است و نمودار شکل ۱ را

تحلیل گودبرداری‌های عمیق پرداخته‌اند [۱۲]. لایکتلسونگ^۱ و همکاران یک گود عمیق را به روش اجزاء محدود و با تمرکز بر مدل‌های رفتاری خاک مورد بررسی قرار داده و نتایج بدست آمده را با مقادیر اندازه‌گیری شده از پروژه و همچنین روش‌های تجربی پیش‌بینی تغییر شکل، مورد مقایسه قرار داده‌اند [۱۳]. سیونگ^۲ و داو^۳ به بررسی مدل رفتاری مدل خاک سخت شونده، مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک، مدل مور کلمب در دیواره پایدار شده به‌وسیله‌ی دیوار دیافراگمی پرداخته‌اند. بر اساس نتایج تحلیل‌ها و مقایسه آن‌ها با مقادیر اندازه گرفته شده، این پژوهشگران بیان داشتند که در مرحله آخر گودبرداری حرکت دیواره در مدل‌های HS و HSS مشابه یکدیگر و مشاهدات است. در مقابل در مدل MC تخمین بزرگ‌تری از تغییرشکل دیواره در عمق‌های پایین دیوار مشاهده می‌شود [۱۴]. عقیف پور و همکاران به بررسی بالا زدگی غیرواقعی در مدل‌سازی عددی مسائل گودبرداری پرداختند و بر اساس نتایج بیان داشتند که رفتار قبل از شکست مصالح در الگوی جابه‌جایی بسیار حائز اهمیت است و مدل رفتاری‌های که در قسمت قبل از شکست بصورت الاستیک خطی دارند، پاسخ‌های منطقی ارائه نمی‌کنند [۱۵]. رحمانی و همکاران به ارزیابی اثر انتخاب مدل‌های رفتاری بر پیش‌بینی جابه‌جایی خاک در مجاورت ترانشه‌های عمیق پایدار شده به روش دیوار دیافراگمی پرداختند و اظهار داشتند که مدل خاک سخت شونده سازگاری بیشتری با نتایج تجربی داشته و استفاده

4 Zolqadr
 5 Bhatkar
 6 Peck

1 Likitlersuang
 2 Hsiung
 3 Dao



شکل ۲. نحوه تغییر شکل دیوار دیافراگمی و نشست سطحی پشت دیوار [۲۱]

Fig. 2. Type of diaphragm wall displacement and surface settlement behind the wall

جدول ۱. خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده از نتایج تحقیقات ونگ و همکارانش [۲۳]

Table 1. A summary of the results of Wang et. al. studies

رابطه بین ارتفاع دیواره (H) و ماکسیمم تغییر شکل افقی دیواره (δhm)	روش پایدارسازی دیواره
δhm در بازه‌ی $0.1\%H$ و $0.55\%H$ با میانگین وزنی $0.27\%H$	روش بالا به پائین
δhm در بازه‌ی $0.1\%H$ و $1\%H$ با میانگین وزنی $0.4\%H$	دیوار دیافراگمی، دیواره‌هایی از شمع ممتد
δhm در بازه‌ی $0.2\%H$ و $0.9\%H$ با میانگین وزنی $0.55\%H$	روش میخ کوبی
δhm در بازه‌ی $0.3\%H$ و $2.4\%H$ با میانگین وزنی $0.91\%H$	دیواره‌ای ساخته شده با روش اختلاط عمیق خاک
δhm در بازه‌ی $0.3\%H$ و $3.2\%H$ با میانگین وزنی $1.5\%H$	دیواره‌ای سپری

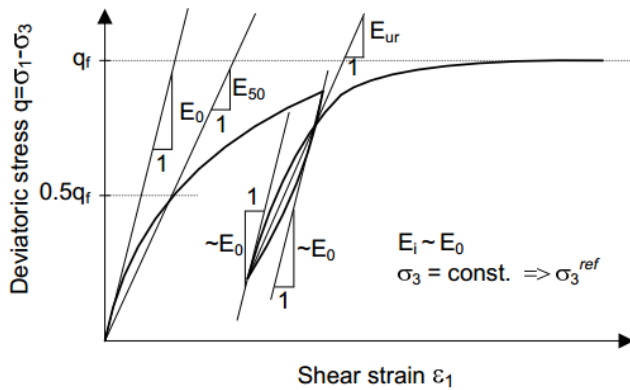
مختلف را مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. لونگ^۵ در سال ۲۰۰۱ پایگاه داده‌ی کاملی را از تغییر شکل‌های ایجاد شده ناشی از گودبرداری عمیق در روش‌های مختلف گودبرداری جمع‌آوری نمود [۲۲]. ارائه نمودارهای تجربی تا سال‌های اخیر ادامه داشته است و از جمله آن‌ها می‌توان به کار ونگ^۶ و همکارانش اشاره نمود که به مطالعه و بررسی بیش از ۳۰۰ مورد گودبرداری با روش‌های مختلف در شانگهای چین پرداختند و با موارد مشابه در دیگر نقاط جهان مقایسه کردند. آن‌ها مقادیر تغییر شکل‌های افقی ناشی از گودبرداری در انواع مختلف سازه‌های نگهبان و همچنین نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین اطراف سازه نگهبان را به تفصیل مورد بررسی قرار دادند. خلاصه‌ای از نتایج تحقیقات ونگ^۷ و همکارانش در جدول ۱ ارائه شده است [۲۳].

برای تخمین میزان نشست خاک پشت دیواره ارائه نمود [۱۹]. بر اساس چندین مطالعه موردی، کلاف^۱ و اروراک^۲ پروفیل نشست خاک پشت دیواره را در خاک‌های ماسه‌ای و رسی سخت بصورت مثلی و در رس‌های نرم و تا حدودی نرم، پروفیل نشست خاک پشت دیواره به صورت ذوزنقه‌ای ارائه نمودند و در این راستا نمودار طراحی نیمه تجربی ارائه نمودند [۲۰].

طبق مطالعات انجام شده توسط سیه^۳ و ئو^۴، دو نوع نشست قوسی و نشست مقعر بر اثر گودبرداری ممکن است اتفاق افتد. شکل این دو نوع تغییر شکل، متأثر از تغییر شکل دیواره‌ی گودبرداری در مراحل ابتدایی گودبرداری می‌باشد. در شکل ۲ نشست قوسی و نشست مقعر مشاهده می‌گردد. این دو محقق در همین راستا نمودارها و روابطی را ارائه نموده و روش‌های تجربی موجود در مطالعه‌های میدانی

5 Long
6 Wang
7 Wang

1 Clough
2 O'Rourke
3 Hsieh
4 Ou



شکل ۳. نمایش مدول‌های مختلف در منحنی تنش و کرنش خاک [۱۰]
 Fig. 3. Different modules in soil stress-strain curve

۳- تشریح مدل‌های رفتاری خاک

مدل‌های رفتاری خاک ارتباط بین تنش یا نرخ تنش را با کرنش یا نرخ کرنش تعیین می‌کنند. با توسعه آنالیزهای عددی، مدل‌های پیشرفته‌ای برای خاک به وجود آمده است. در آنالیزهای ژئوتکنیکی به‌خصوص آنالیز گودبرداری در راستای بدست آوردن نتایج منطقی، مدل رفتاری خاک باید به‌طور دقیقی بیانگر رفتار خاک باشد. در ادامه مدل‌های رفتاری مورد استفاده در این مقاله مختصراً معرفی می‌گردند.

۳-۱- مدل مور کلمب (MC)

مدل مور-کلمب یک مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک است و در واقع ترکیبی از قانون هوک و شکل عمومی ضابطه تسلیم کلمب است. این مدل چهار پارامتر را شامل می‌شود که دو تا از آن‌ها پارامترهای شبه الاستیک از قانون هوک (مدول یانگ E و نسبت پواسون ν) و دو پارامتر از ضابطه تسلیم کلمب (زاویه اصطکاک ϕ و چسبندگی c) می‌باشند.

۳-۲- مدل خاک سخت شونده (HS)

مدل خاک سخت شونده در چارچوب تئوری پلاستیسیتیه در سال ۱۹۹۸ توسط شنز^۱ و همکارانش پایه گذاری گردید [۲۴]. مدل خاک سخت شونده، یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار انواع خاک‌های نرم و سخت است. این مدل دارای دو نوع سخت‌شوندگی برشی و فشاری است. برخلاف یک مدل الاستیک-پلاستیک کامل، سطح تسلیم یک مدل پلاستیک سخت شونده در فضای تنش‌های اصلی ثابت نیست و می‌تواند با کرنش پلاستیک توسعه یابد. این مدل دارای ویژگی سخت‌شدگی اصطکاک در راستای مدل‌سازی کرنش برشی پلاستیک در بارگذاری انحرافی (تفاضلی) و ویژگی سخت‌شوندگی کلاهدک برای مدل‌سازی کرنش حجمی پلاستیک در بارگذاری اولیه می‌باشد. تسلیم بوسیله‌ی ضابطه شکست مور-کلمب تعریف می‌شود. مدل خاک سخت شونده نیازمند ۹ پارامتر می‌باشد. ۳ پارامتر سختی مرجع (E_{50}^{ref} برای فشردگی سه محوری، E_{oed}^{ref} برای بارگذاری اذئومتر و E_{ur}^{ref} برای مدول یانگ الاستیک یا همان باربرداری-بارگذاری مجدد) در سطح تنش مرجع p^{ref} توان m برای فرمول‌بندی سختی وابسته به تنش، ضریب پواسون الاستیک یا همان

باربرداری-بارگذاری مجدد ($\bar{\sigma}_{ur}$)، پارامترهای مور-کلمب (c, ϕ)، مقادیر K در فشردگی اولیه یک‌بعدی (K_0^{NC}) و نسبت گسیختگی (R_p) که سطح کرنش نسبت به تسلیم را نشان می‌دهد. در شکل ۳ مدول‌های مختلف در منحنی تنش و کرنش خاک نشان داده شده است. بر اساس کالوالو^۲ و فینو^۳ $E_{50}^{ref} = \frac{1}{3} E_{ur}^{ref}$ و $E_{oed}^{ref} = 0/7 E_{50}^{ref}$ می‌باشد [۱۱].

جانبو^۴ مقادیر m را برای خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی نروژ، حدود ۰/۵ تا ۰/۷ پیشنهاد نمود. در حالی‌که ون سوز^۵ مقادیر مختلفی از m در محدوده ۰/۵ تا ۱ گزارش کرده است [۲۴]. در مقایسه مدل HS و MC، مدل MC پیش از گسیختگی، الاستیک است و هم‌زمان با رسیدن به گسیختگی به پلاستیک تغییر می‌کند. در مقابل پاسخ واقعی خاک حتی پیش از تسلیم الاستوپلاستیک غیرخطی است. مدل HS رفتار غیرخطی را با تغییر مدول در هنگام بارگذاری اولیه لحاظ می‌کند. تحت شرایط زه‌کشی شده، مدول برای ماسه و رس وابسته به تنش می‌باشد. این رفتار وابسته به تنش در مدل HS لحاظ می‌شود.

۳-۳- مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک (HSS)

سختی بالای خاک در کرنش‌های بسیار کوچک (کوچک‌تر از 10^{-5}) نقش مهمی را در رفتار خاک‌برداری‌ها، پی‌ها و پروژه‌های با

2 Calvello
 3 Finno
 4 Janbu
 5 Von Soos

1 Schanz



شکل ۴. دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران
Fig. 4. Centrifuge of Iran University of Science and Technology

۴- بررسی مدل‌های رفتاری در دیوار میخکوبی شده

برای صحت سنجی عملکرد مدل رفتاری‌های مختلف در دیوار میخکوبی شده از ۴ آزمایش سانتریفیوژ استفاده شده است. ۴ مدل سانتریفیوژ در این آزمایش‌ها به گونه‌ای ساخته شده‌اند که بتوان عملکرد مدل‌های رفتاری را با توجه به فاصله سازه مجاور مورد بررسی قرارداد [۲۶]. همچنین لازم به ذکر است شتاب هدف در این پژوهش ۵۰g می‌باشد. این آزمایش‌ها در مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه علم و صنعت ایران دارای شعاع ۱ متر (تا کف جعبه دستگاه) و قابلیت رسیدن به شتابی معادل ۲۰۰g را دارا می‌باشد (شکل ۴).

قوانین مقیاس مدل‌های فیزیکی با توجه به اعمال ضرایب کوچک نمایی بر اساس ابعاد واقعی پروژه‌ها ساخته می‌شوند؛ بنابراین مشخصات مصالح و المان‌ها در مدل فیزیکی باید به دقت مقیاس شوند تا بتوان رفتار سازه واقعی را از آن انتظار داشت و خطاهای ناشی از اثر مقیاس را به حداقل رسانید. از طرفی ماهیت رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی وابسته به تنش می‌باشد و بسته به سطح تنش وارده رفتار متفاوتی را نشان می‌دهند. اگر بتوان به طریقی شرایط تنش در نقاط متناظر مدل و واقعیت را با هم یکسان نمود تا حدود بسیار زیادی مشکل ناشی از خطاهای اثر مقیاس ناچیز می‌گردد. سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دستگاهی است که با افزایش موضعی شتاب گرانشی توسط دوران، کاهش تنش ناشی از کوچک شدن مدل را جبران می‌نماید. در سانتریفیوژها بر اساس نسبت شتاب گرانشی به شتاب

سطح کرنش اصطلاحاً مهندسی ایفا می‌کند. مدل خاک سخت شونده با سختی ناشی از کرنش‌های کوچک برای در نظر گرفتن همین موضوع توسعه داده شده است. با انجام اصلاحاتی روی مدل خاک سخت شونده، اثر سختی بالای مصالح در کرنش‌های کوچک در نظر گرفته شده است. برای وارد کردن اثر افزایش غیرخطی سختی در کرنش‌های کوچک‌تر از کرنش‌های مهندسی، دو پارامتر G_0 و $\gamma_{0.7}$ علاوه بر پارامترهای قبلی وارد مدل HS شدند و مدل جدید HSS نامیده شد. G_0 عبارت است از مدول برشی اولیه و $\gamma_{0.7}$ عبارت است از کرنش برشی، زمانی که مقدار مدول برشی به $0.7G_0$ رسیده باشد. تفاوت اصلی مدل HSS با HS استفاده از یک معیار تسلیم و نیز قانون جریان اصلاح شده می‌باشد. به همین دلیل مدل HSS در مقایسه با مدل HS تنش گسیختگی کمتری را نشان می‌دهد [۱۰، ۲۵].

$\gamma_{0.7}$ بوسیله‌ی رابطه‌ی (۱) که توسط پلکسیس^۱ پیشنهاد شده، محاسبه می‌شود [۱۱]. در رابطه‌ی (۱)، K_0 ضریب فشار جانبی در حالت سکون و σ'_1 تنش قائم مؤثر می‌باشد.

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0} [2c'(1 + \cos 2\varphi') - \sigma'_1(1 + K_0) \sin 2\varphi'] \quad (1)$$

البته با توجه به آنالیز برگشتی صورت گرفته در پژوهش‌های مانند لیم^۲ و همکاران [۱۱] با در نظر گرفتن $\gamma_{0.7}$ برابر با 10^{-5} ، نتایج حاصله نسبت به استفاده از رابطه‌ی (۱) به مقادیر اندازه گیری شده نزدیک تر گردید.

1 Plaxis
2 Lim

جدول ۳. مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه [۲۶]

Table 3. Physical characteristics of 161 Firoozkooch sand

ϕ	e_{max}	e_{min}	Cu	Cc	Gs
۳۲	۰/۹۴۳	۰/۶۰۴	۲/۵۸	۰/۹۷	۲/۶۵

جدول ۴. تنش تسلیم میخ فولادی و برنجی [۲۶]

Table 4. Yield stress of steel and brass nails

تنش تسلیم (kgf/cm ²)	مدول الاستیسیته (kN/m ²)	نوع مصالح
۲۴۰۰	۲.۱*۱۰ ^۸	میخ فولادی
۱۱۵۰	۱.۱۷*۱۰ ^۸	میخ برنجی

مسلح کننده برابر با ۳۰ میلی‌متر و شتاب هدف برابر $N=50g$ قطر میله‌ی برنجی بر اساس رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید.

$$(EA)_p = N^2 (EA)_m \rightarrow D_m = 0.8 \text{ mm} \quad (2)$$

مشخصات خاک برای مدل رفتاری‌های مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به آنالیز برگشتی انجام گرفته در بررسی یک گودبرداری در خاک ماسه‌ای که توسط هسیونگ و داو صورت گرفت، E_{50}^{ref} برابر با $60\%E$ مدل MC بدست آمد و همچنین G_0 با ساده سازی روابط تجربی به صورت رابطه‌ی ۳ حاصل شد. در پژوهش حاضر از روابط ارائه شده توسط هسیونگ و داو استفاده شده است.

$$G_0 = 5109.4 \frac{\gamma}{g} \left(\frac{E}{2000} \right)^{0.782} \quad (3)$$

در دیوارهای میخ‌کوبی شده جهت جلوگیری از گسیختگی‌های موضعی در دیواره، از پوشش‌های بتنی (شاتکریت) استفاده می‌گردد. ضخامت پوشش‌های بتنی در پروژه‌های متداول، ۵ الی ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد که به جهت مدل‌سازی این پوشش در آزمایشات سانتریفیوژ از پلاستیک شفاف از جنس PVC استفاده شده است. با آنالیز ابعادی سختی خمشی و در نظر گرفتن ۵ سانتی‌متر برای شاتکریت، شتاب هدف $N=50g$ ، مدول الاستیسیته بتن برابر $E_p=18.5G10^6 \text{ KN/m}^2$ ، مدول الاستیسیته PVC برابر $E_m=2.5G10^6 \text{ KN/m}^2$ که بر اساس آزمایش بر روی PVC بدست آمده است، ضخامت معادل t در مدل‌سازی سانتریفیوژ مقدار $0/6$ میلی‌متر به دست می‌آید (رابطه‌ی (۴)).

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی مختلف در واقعیت و مدل سانتریفیوژی [۲۷]

Table 2. Different physical parameters in reality and centrifuge model

سانتریفیوژ- Ng	پارامتر	کمیت
$1/N$	n_l	طول
1	n_ρ	جرم مخصوص
N	n_g	شتاب
1	n_G	سختی
1	$n_\rho n_g n_l$	تنش
$1/N^2$	$n_\rho n_g n_l^3$	نیرو
1	$n_\rho n_g n_l / n_G$	کرنش
$1/N$	$n_\rho n_g n_l^2 / n_G$	جابه‌جایی

ثقل زمین (که با N نمایش داده می‌شود)، ابعاد مدل با ضریب $(1/N)$ کوچک می‌گردند. به‌طور ساده اگر مدلی در شعاع r با سرعت زاویه‌ای w بچرخد، شتاب شعاعی آن rw^2 خواهد بود و N از رابطه $N=rw^2/g$ دست می‌آید (g شتاب ثقل زمین). با توجه به قوانین مقیاس و آنالیز ابعادی نسبت پارامترهای فیزیکی مختلف در واقعیت و مدل سانتریفیوژی در جدول ۲ نشان داده شده است.

۴-۱- مشخصات آزمایش‌ها سانتریفیوژ

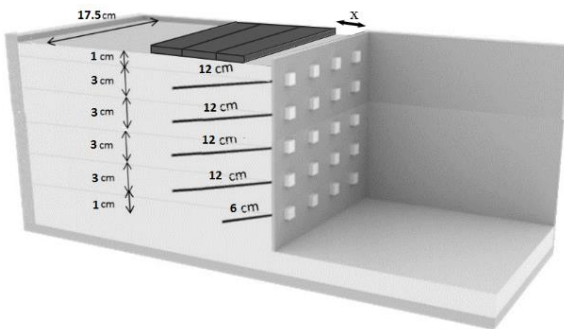
مصالح خاکی بکار رفته در این آزمایش‌ها، ماسه سیلیسی ۱۶۱ فیروزکوه می‌باشد که این ماسه دارای دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت و رنگ طلایی می‌باشد و از نظر فیزیکی به ماسه توریورا و سنگنیاما شباهت دارد. مدول الاستیسیته این خاک در تراکم ۷۰ درصد برابر ۴۰ مگا پاسکال می‌باشد [۲۶]. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه در جدول ۳ نشان داده شده است.

در آزمایش‌های سانتریفیوژ از میخ‌های برنجی به قطر $0/8$ میلی‌متر به عنوان مهار استفاده شده است که با انجام آنالیز ابعادی معادل میلگرد $30f$ می‌باشند. لازم به ذکر است که می‌توان از جنس‌های دیگر مانند فولاد یا آهن استفاده نمود، لیکن به دلیل کوچک‌تر شدن قطر معادل (به دلیل افزایش مدول الاستیسیته)، استفاده از این مصالح ممکن نبود. تنش تسلیم میخ فولادی و برنجی به شرح جدول ۴ می‌باشند. با توجه به قوانین تشابه ابعادی، سختی محوری در مدل اصلی $((EA)_p)$ ، N^2 برابر سختی محوری در مدل کوچک مقیاس $((EA)_m)$ می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن قطر

جدول ۵. مشخصات خاک برای مدل رفتاری‌های مختلف

Table 5. Soil characteristics for different behavioral models

مشخصات	واحد	مدل MC	مدل HS	مدل HSS
وزن مخصوص غیراشباع، γ_{unsat}	[kN/m ³]	۱۵.۵	۱۵.۵	۱۵.۵
چسبندگی، C	[kN/m ²]	۰	۰	۰
زاویه اصطکاک، ϕ	[°]	۳۵	۳۵	۳۵
زاویه اتساع، ψ	[°]	۵	۵	۵
مدول یانگ، E	[kN/m ²]	۴۰۰۰۰	-	-
سختی سکانت ۵۰٪، E_{50}^{ref}	[kN/m ²]	-	۲۴۰۰۰	۲۴۰۰۰
سختی مماس ادنومتر، E_{oed}^{ref}	[kN/m ²]	-	۱۶۸۰۰	۱۶۸۰۰
سختی باربرداری-گذاری مجدد، E_{ur}^{ref}	[kN/m ²]	-	۷۲۰۰۰	۷۲۰۰۰
ضریب رانش خاک در حالت سکون، K_0	[-]	۰.۴۲۷	۰.۴۲۷	۰.۴۲۷
ضریب پواسون، ν	[-]	۰.۳۵	۰.۳۵	۰.۳۵
ضریب پواسون باربرداری-بارگذاری مجدد، ν_{ur}	[-]	-	۰.۲	۰.۲
توان تراز وابسته به سختی، m	[-]	-	۰.۵	۰.۵
نسبت گسیختگی، R_{int}	[-]	-	۰.۹	۰.۹
مدول برشی مرجع در کرنش کوچک، G_0^{ref}	[kN/m ²]	-	-	۸۳۰۰۰
کرنش برشی، $\gamma_{0/7}$	[-]	-	-	۵-۱۰



شکل ۵. تصویر شماتیک از جعبه مورد آزمایش در سانتریفیوژ
Fig. 5. Schematic of the box test in the centrifuge

دو غاب سیمان تزریق شده در واقعیت، میخ‌های برنجی ابتدا به چسب مایع آغشته شدند و سپس ماسه بر روی میخ‌های در حال چرخش ریخته شد، به طوری که تمامی سطح میخ با ماسه پوشانده شد و اجازه داد شد تا با گذشت زمان چسب مایع سفت شود. بدین طریق سطح میخ برنجی به وسیله ماسه ۱۶۱ مژرس گردید و بعد از آن، میخ‌ها به درون خاک فرو داده شدند.

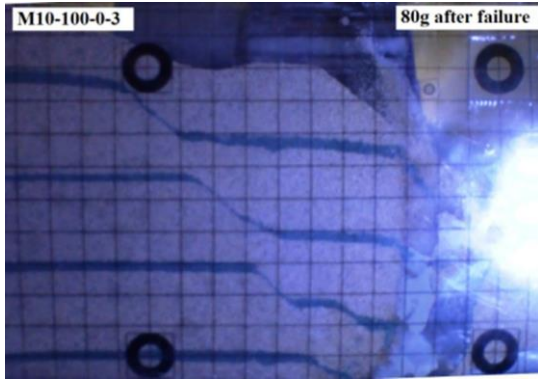
از سه قطعه مکعب مستطیل فولادی به ابعاد $17/5 \times 5 \times 2/6$ سانتی‌متر به عنوان سربار استفاده شد که با توجه به وزن مخصوص فولاد و آنالیز ابعادی، تنش ناشی از این صفحات در مدل واقعی برابر با

$$(EI)_p = N^4 (EI)_m \rightarrow t = 0.6 \text{ mm} \quad (4)$$

در آزمایش‌های سانتریفیوژ ارتفاع دیواره مدل ها ۱۴ سانتی‌متر می‌باشد و از ۵ ردیف میخ همانند تصویر شماتیک شکل ۵ استفاده شده است. فاصله‌ی افقی میخ‌ها از یکدیگر ۳ سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۵، x فاصله افقی سربار از لبه گود می‌باشد و به ترتیب در مدل ۱ تا ۴ برابر ۰، $h/4$ ، $h/2$ و $3h/4$ است. با توجه به شتاب هدف ۵۰g، برای آنالیز ابعادی کافی است مقادیر مذکور در عدد ۵۰ ضرب شوند. در این صورت فاصله سربار در مدل ۱ تا ۴ در واقعیت برابر صفر، $1/75$ ، $3/5$ و $5/25$ متر می‌گردد [۲۶].

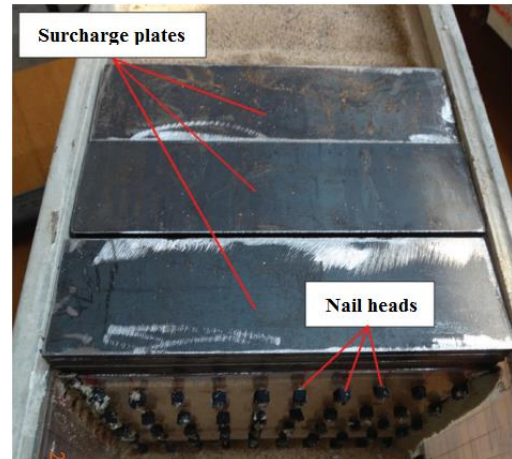
۴-۲- ساخت مدل‌های سانتریفیوژ

برای نمونه‌سازی، در گام‌های سه سانتی‌متری خاک بوسیله بارش خشک ریخته شد و این گام‌ها تا رسیدن به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر از کف محفظه ادامه پیدا نمود. در انتها دیواری با یک سانتی‌متر خاک بستر و ۱۴ سانتی‌متر ارتفاع ساخته شد که در شتاب ۵۰g به ترتیب معادل ارتفاع ۰/۵ متر و ۷ متر خواهند بود. میخ‌ها پس از انجام بارش خشک به درون خاک فروداده شدند. به جهت مدل‌سازی

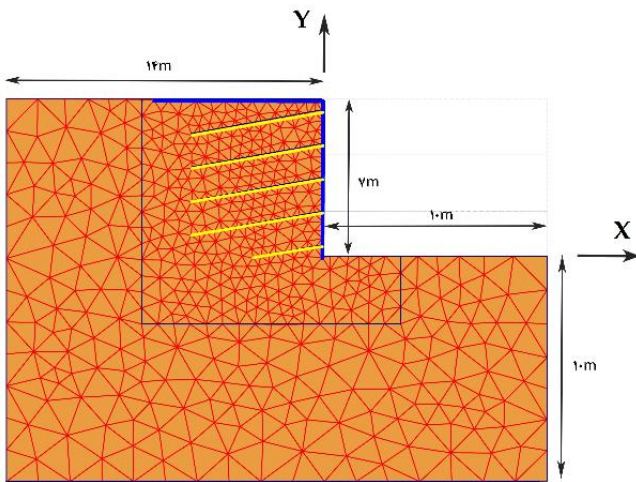


شکل ۷. مدل ۱ در سانتریفیوژ پس از رسیدن به شتاب گسیختگی ۸۰g [۲۶]

Fig. 7. Model 1 in the centrifuge after reaching the failure acceleration of 80 g



شکل ۶. صفحات استفاده شده به عنوان سربار و میخ‌ها در نمونه سانتریفیوژ
Fig. 6. Plates used as overhead and nails in the centrifuge sample



شکل ۸. مدل ۱ در نرم‌افزار اجزای محدود به همراه مش بندی

Fig. 8. Model 1 in finite element software with mesh

برابر $h/3$ خاک‌برداری می‌باشد) برای گودبرداری مدل سانتریفیوژ ۱ به صورت شکل ۹ می‌باشد (محورهای مختصات مطابق شکل ۸). با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹ می‌توان پی برد، اختلاف مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار و مقادیر اندازه‌گیری شده با افزایش میزان خاک برداری کاهش می‌یابد و در فاز آخر این مقادیر کمترین اختلاف را نسبت به یکدیگر را دارد. این کاهش اختلاف تغییرشکل در حل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده از مدل سانتریفیوژ را می‌توان به نوع مکانیسم انتقال بار توسط میخ‌ها ربط داد، چراکه برای فعال شدن میخ‌ها نیاز به ایجاد تغییرشکل وجود دارد که این نیاز به تغییرشکل و فعال شدن میخ‌ها، با مقایسه‌ی میزان تغییرشکل

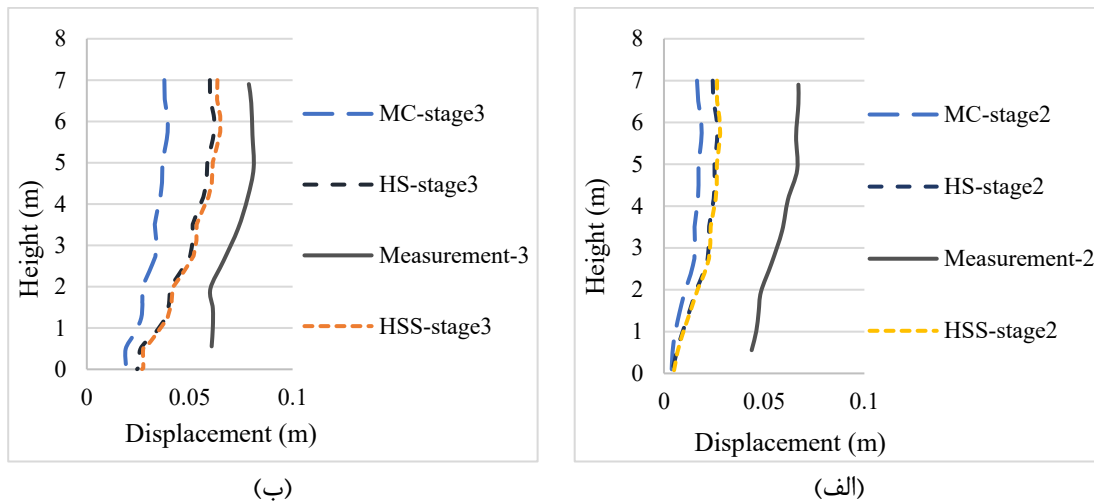
۱۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. در شکل ۶ صفحات استفاده شده به عنوان سربار و میخ‌ها در نمونه سانتریفیوژ نشان داده شده‌اند. برای شبیه‌سازی گودبرداری از کیسه‌های PVC پر از آب استفاده شده است. زمانی که سانتریفیوژ به شتاب ۵۰g می‌رسد آب در سه گام ۵ سانتی‌متری تخلیه می‌گردد و به این شکل عمل گودبرداری مدل‌سازی می‌شود. تغییرشکل‌های حاصله توسط یک دوربین دیجیتال ثبت شده و با پردازش تصویر مقادیر عددی آن‌ها به دست می‌آیند [۲۶]. در شکل ۷، جعبه دیوار میخ‌کوبی شده مدل ۱ در سانتریفیوژ پس از رسیدن به شتاب گسیختگی ۸۰g نمایش داده شده است.

۵- نتایج

با توجه به آنالیز ابعادی، مدل‌های ۱ تا ۴ در ابعاد واقعی در نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی شده است. مشخصات میلگرد $(EA = 14/83 \times 10^4 \text{ kN})$ و سطح رویه‌ی بتنی بر اساس آنالیز ابعادی بیان شده در بخش مشخصات آزمایش‌های سانتریفیوژ و مشخصات خاک بر اساس جدول ۵ به نرم‌افزار وارد شده است. در شکل ۸ مدل ۱ به همراه مش بندی دیده می‌شود.

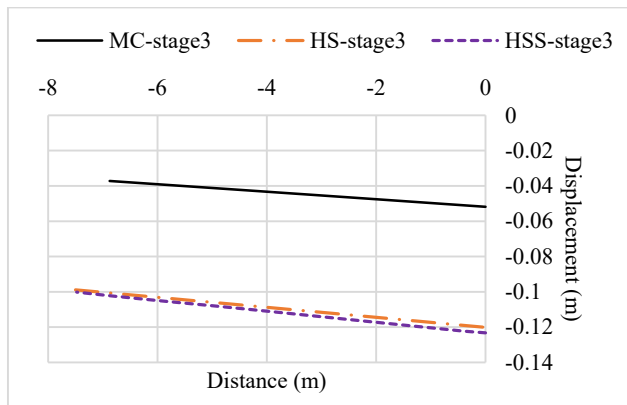
۵-۱- مدل سانتریفیوژ ۱ ($x=0$)

با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری MC، HS و HSS در حل عددی میزان جابه‌جایی‌ها در دیواره در گام‌های ۲ و ۳ (هر گام



شکل ۹. تغییر شکل دیواره گودبرداری (الف) در فاز دوم خاکبرداری (ب) در فاز سوم خاکبرداری مدل ۱

Fig. 9. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation for Model 1



شکل ۱۰. تغییر شکل قائم خاک پشت دیواره گودبرداری در مدل ۱

Fig. 10. Vertical displacement of the soil behind the excavation wall in Model 1

مدل سانتریفیوژ ۲ بصورت شکل ۱۱ می‌باشد. همچون مدل سانتریفیوژ قبل میزان اختلاف در تغییر شکل اندازه‌گیری شده و بدست آمده از تحلیل عددی در فازهای اولیه گودبرداری نسبت به فاز آخر، بیشتر می‌باشد. در فازهای ۲ و ۳ الگوی تغییر شکل بدست آمده از حل عددی مشابه با الگوی تغییر شکل اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقادیر تغییر شکل بدست آمده با استفاده از مدل MC در تمامی فازها مقدار کمتری نسبت به مدل‌های HS و HSS دارا می‌باشد و اختلاف بیشتری نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده دارد. مدل HS و HSS در فاز آخر تطابق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. نکته‌ی حائز اهمیت دیگر آنکه بیشترین

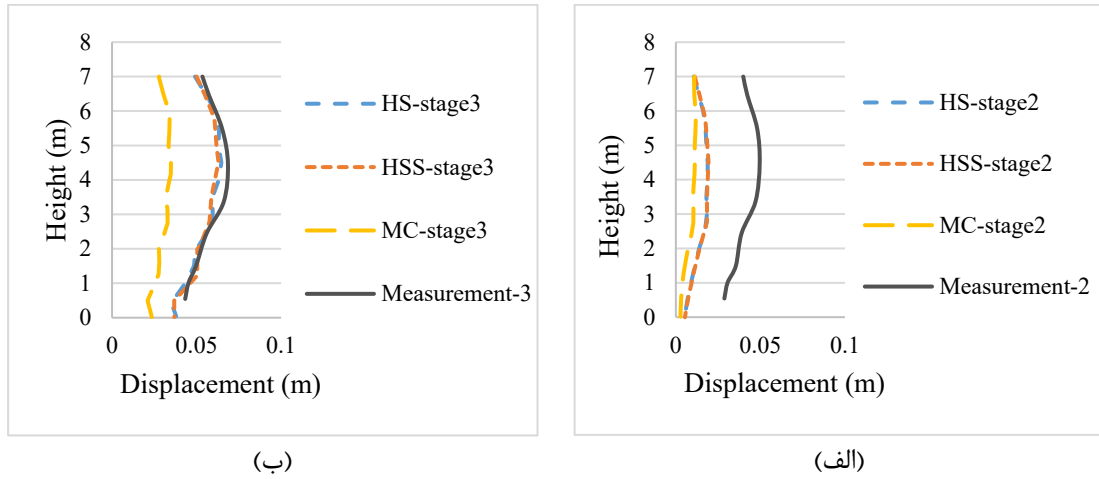
دیواره در فازهای ابتدایی و فاز آخر، در مدل فیزیکی به خوبی قابل رؤیت می‌باشد. در مقایسه مقادیر بدست آمده از مدل‌های رفتاری مختلف می‌توان بیان داشت میزان تخمین زده شده در مدل خاک سخت شونده ی کوچک مقیاس (HSS) به میزان اندازه‌گیری شده نزدیک تر می‌باشد. البته مقادیر بدست آمده از دو مدل HS و HSS چندان یا یکدیگر اختلاف ندارند. همچنین می‌توان پی برد الگوی پیش‌بینی شده در خاک غیر چسبنده در هر سه مدل تقریباً یکسان می‌باشد.

در شکل ۱۰ تغییر شکل قائم خاک پشت دیواره گود در تراز تاج برای مدل ۱ سانتریفیوژ در مدل‌های رفتاری مختلف ارائه شده است (تاج گود به عنوان مبدأ مختصات).

تغییر شکل قائم اندازه‌گیری شده تاج گود در مدل سانتریفیوژ پس از مقیاس نمودن برابر ۱۲/۸۸ میلی‌متر می‌باشد و این مقدار در مدل‌های MC، HS و HSS به ترتیب برابر ۵/۱۸، ۱۲/۰۵ و ۱۲/۳۲ میلی‌متر می‌باشد و حاکی از اختلاف ناچیز مقدار بدست آمده از مدل‌های رفتاری HS و HSS با میزان اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین با توجه به نمودار شکل ۱۰، ضعف مدل مور کلمب در پیش‌بینی میزان نشست خاک پشت دیواره کاملاً مشهود می‌باشد.

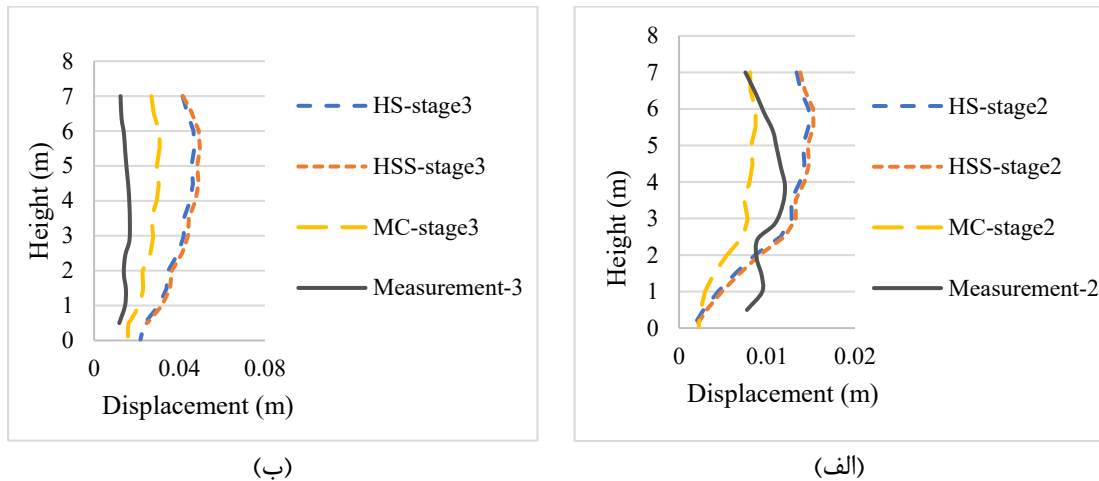
۲-۵- مدل سانتریفیوژ ۲ ($x=h/4$)

با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری MC، HS و HSS در حل عددی میزان جابه‌جایی‌ها در دیواره در گام‌های ۲ و ۳ گودبرداری



شکل ۱۱. تغییر شکل دیواره گودبرداری (الف) در فاز دوم خاک‌برداری (ب) در فاز سوم خاک‌برداری مدل ۲

Fig. 11. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation for Model 2



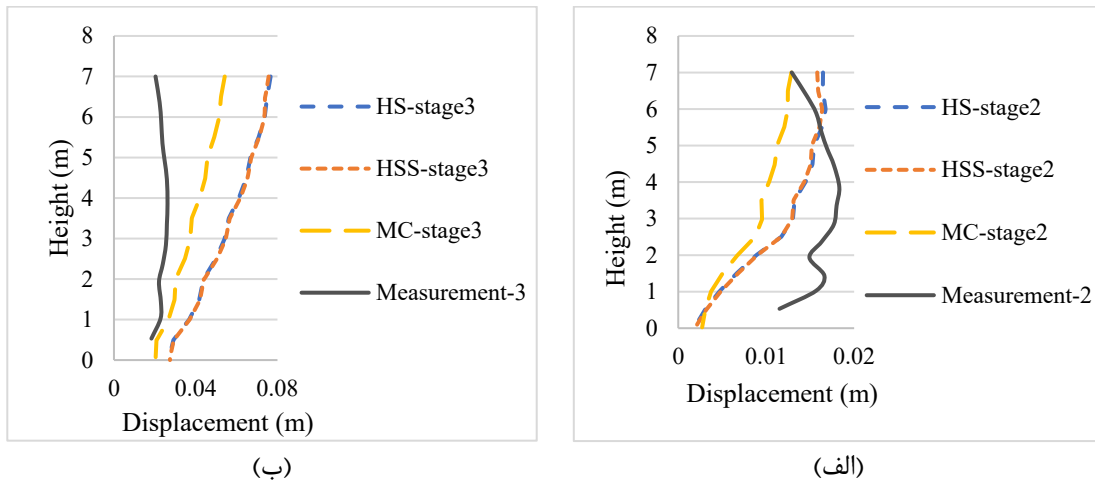
شکل ۱۲. تغییر شکل دیواره گودبرداری (الف) در فاز دوم خاک‌برداری (ب) در فاز سوم خاک‌برداری مدل ۳

Fig. 12. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation for Model 3

۳-۵- مدل سانتریفیوژ $(x=h/2)$

با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری MC، HS و HSS در حل عددی میزان جابه‌جایی‌ها در دیواره در گام‌های ۲ تا ۳ گودبرداری مدل سانتریفیوژ ۳ به صورت شکل ۱۲ می‌باشد. با افزایش فاصله‌ی بار اعمالی از تاج گود میزان بیشینه تغییر شکل افقی دیواره به سمت پاشنه گودبرداری انتقال پیدا نموده است. در فاز ۲ مقدار تغییر شکل تاج گود تقریباً برابر با میزان پیش‌بینی شده توسط مدل MC می‌باشد. این در حالی است که دو مدل HS و HSS میزان بیشتری را پیش‌بینی نموده‌اند و همچنین برخلاف دو مدل سانتریفیوژ قبل، در فاز آخر میزان اندازه‌گیری شده بر اساس مدل سانتریفیوژ از مقادیر حل عددی کمتر می‌باشد.

تغییر شکل افقی در مقادیر اندازه‌گیری شده و همچنین بر اساس حل‌های عددی در تاج گودبرداری رخ نداده است. میزان تغییر شکل قائم در تاج گود به روش پردازش تصویر در مدل سانتریفیوژ پس از مقیاس نمودن برابر $12/25$ سانتی‌متر بدست آمده است. به این ترتیب مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل رفتاری MC ($4/9$ سانتی‌متر) از مقدار اندازه‌گیری شده کمتر می‌باشد. ولی مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل‌های رفتاری HS و HS (به ترتیب برابر $12/87$ و $13/7$ سانتی‌متر) اندکی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشند. در این مدل سانتریفیوژ نیز مقدار مدل مور-کولمب کمترین مقدار را پیش‌بینی کرده و بیشترین اختلاف را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.



شکل ۱۳. تغییرشکل دیواره گودبرداری (الف) در فاز دوم خاک‌برداری (ب) در فاز سوم خاک‌برداری مدل ۴

Fig. 13. Deformation of the excavation wall (a) in the second phase of excavation (b) in the third phase of excavation Model 4

گودبرداری باشد.

برای بررسی دلیل افزایش عمق بیشترین تغییرشکل افقی دیواره گود، تأثیر وجود سربار در اضافه تنش در عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. بر اساس تئوری بوسینسک، اضافه تنش ناشی از پی نواری مشابه با شکل ۱۴ و بر اساس روابط (۵) تا (۷) بدست می‌آید [۲۸].

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos (\alpha + 2\beta)] \quad (5)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{(x+b)}{z} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{(x-b)}{z} \right] \quad (6)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{(x-b)}{z} \right] \quad (7)$$

بر اساس ربط بالا پروفیل اضافه تنش ($\Delta\sigma$) ناشی از سربار در برابر عمق گود در دیواره گود مدل‌های ۱ تا ۴ سانتریفیوژ بصورت شکل ۱۵ می‌گردد.

با توجه به شکل ۱۵ بیشترین اضافه تنش ناشی از سربار با دور شدن سربار از لبه‌ی گود به تراز پایینی گود انتقال یافته است و رابطه‌ی مستقیمی با انتقال بیشترین تغییرشکل افقی دیواره به سمت پنجه گود در مدل‌های سانتریفیوژی دارد.

تغییرشکل‌های تاج گود در گودبرداری از اهمیت بالایی برخوردار هستند، چراکه سازه مجاور گودبرداری بسیار متأثر از این تغییرشکل‌ها می‌باشد. با توجه به پژوهش حاضر میزان تغییرشکل تاج گود بر اساس حل عددی، در مدل ۱ که سربار در لبه گود قرار دارد، کوچک‌تر از

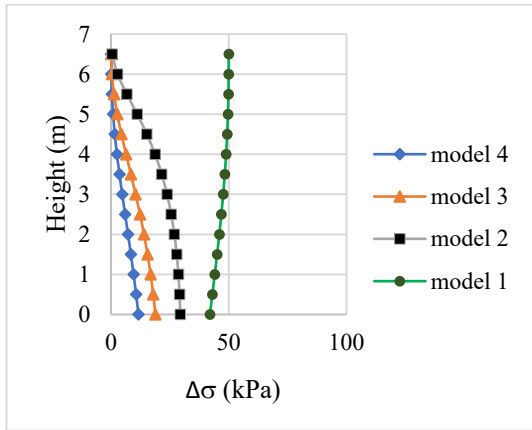
۴-۵- مدل سانتریفیوژ ۴ ($x=3h/4$)

با در نظر گرفتن مدل‌های رفتاری MC، HS و HSS در حل عددی میزان جابه‌جایی‌ها در دیواره در گام‌های ۲ و ۳ گودبرداری مدل سانتریفیوژ ۴ به صورت شکل ۱۳ می‌باشد.

در فاز ۲ مقدار تغییرشکل تاج گود برابر با میزان پیش‌بینی شده توسط مدل MC می‌باشد. این در حالی است که دو مدل HS و HSS میزان بیشتری را پیش‌بینی نموده‌اند و همچون مدل ۳ سانتریفیوژ در فاز آخر میزان اندازه‌گیری شده از مقادیر حل عددی کمتر می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله سربار از محل گودبرداری، میزان بیشینه تغییرشکل افقی در دیواره به سمت پایین دیواره انتقال پیدا می‌کند و با افزایش فاصله بعد از $x > h/2$ (عمق گودبرداری و x فاصله سربار از لبه‌ی گودبرداری است)، میزان تغییرشکل در تاج گودبرداری در فاز آخر از میزان پیش‌بینی شده از حل عددی کمتر می‌شود.

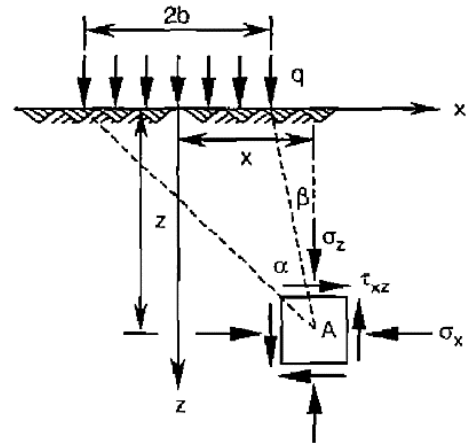
۶- بحث و بررسی

با فاصله گرفتن سربار از لبه‌ی گود میزان بیشینه تغییرشکل افقی دیواره گودبرداری از لبه‌ی گود به سمت پایین گود جابه‌جا می‌شود. زمانی که $x > h/2$ میزان تغییرشکل در تاج گودبرداری در فاز آخر از میزان پیش‌بینی شده از حل عددی کمتر می‌شود. همچنین در این حالت الگوی پیش‌بینی شده توسط حل عددی متفاوت با الگوی واقعی تغییرشکل دیواره می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی ضعف حل عددی در پیش‌بینی تغییرشکل گودبرداری در ترازهای پایینی



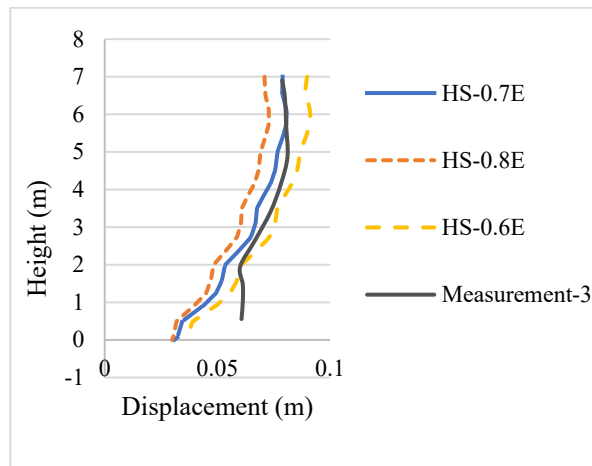
شکل ۱۵. اضافه تنش ناشی از سربار در مدل‌های ۱ تا ۴ سانتریفیوژ در دیواره گود

Fig. 15. Excess stress due to overhead in Models 1 to 4 centrifuges in the excavation wall



شکل ۱۴. مؤلفه‌های تنش در زیر بار نواری با بار یکنواخت و طول بی‌نهایت [۲۸]

Fig. 14. Stress components under a strip load with uniform load and infinite length



شکل ۱۶. تغییر مکان افقی دیواره در گام آخر خاک‌برداری بر اساس مقادیر مدول یانگ اصلاحی

Fig. 16. Horizontal displacement of the wall in the last step of excavation based on the values of the modifying Young's modulus

جدول ۶. مشخصات اصلاح‌شده خاک برای مدل رفتاری های MC و HS

Table 6. Modified soil characteristics for MC and HS behavioral models

مدل HS	مدل MC	واحد	مشخصات
-	۲۸۰۰۰	[kN/m ²]	مدول یانگ، E
۱۶۸۰۰	-	[kN/m ²]	سختی سکانت ۰/۵۰، E ₅₀ ^{ref}
۱۱۷۶۰	-	[kN/m ²]	سختی مماس ادنومتر، E _{oed} ^{ref}
۵۰۴۰۰	-	[kN/m ²]	سختی باربرداری-گذاری مجدد، E _{ur} ^{ref}

می‌شود. حل عددی با استفاده از مدل HS و بر اساس مقادیر مدول یانگ اصلاحی انجام گردید و تغییر مکان افقی دیواره در گام آخر خاک‌برداری بر اساس مقادیر مدول یانگ اصلاحی بصورت شکل ۱۶ بدست آمد.

مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. برای تطابق حل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده از آنالیز برگشتی بر روی مدول یانگ استفاده می‌شود و مقدار این پارامتر خاک در ضرایب ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ ضرب می‌گردد که به ترتیب برابر ۲۴۰۰۰، ۳۲۰۰۰ و ۲۸۰۰۰ کیلوپاسکال

سانتریفیوژ ۲ ($x=h/4$) نتایج مدل رفتاری های HS و HSS در فاز آخر تطابق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند و در این حالت نیازی به تغییر پارامترهای خاک وجود نداشت. با توجه به مدل‌های ۳ و ۴ سانتریفیوژ (در حالتی که $x \geq h/2$ می‌باشد) میزان تغییرشکل افقی در تاج گودبرداری در فاز آخر از میزان پیش‌بینی شده از حل عددی کمتر می‌شود و الگوی تغییرشکل در حل عددی و مدل سانتریفیوژ متفاوت می‌باشد. در این حالت در فاز آخر گودبرداری، تغییرشکل افقی پیش‌بینی شده از مدل MC کمترین اختلاف را با مقادیر اندازه‌گیری شده از مدل سانتریفیوژ دارد و در نتیجه این مدل گزینه مناسب‌تری برای استفاده در حل عددی برای پیش‌بینی تغییرشکل افقی دیواره در حالت $x \geq h/2$ می‌باشد.

مراجع

- [1] K. Dan, R. Sahu, Ground Movement Prediction For Braced Excavation in Soft Clay, (2010).
- [2] Y.-G. Tang, G.T.-C. Kung, Investigating the effect of soil models on deformations caused by braced excavations through an inverse-analysis technique, Computers and Geotechnics, 37(6) (2010) 769-780.
- [3] G.T. Kung, E.C. Hsiao, M. Schuster, C.H. Juang, A neural network approach to estimating deflection of diaphragm walls caused by excavation in clays, Computers and Geotechnics, 34(5) (2007) 385-396.
- [4] J.G. Zornberg, N. Sitar, J.K. Mitchell, Performance of geosynthetic reinforced slopes at failure, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(8) (1998) 670-683.
- [5] Y. Hu, G. Zhang, J.-M. Zhang, C. Lee, Centrifuge modeling of geotextile-reinforced cohesive slopes, Geotextiles and geomembranes, 28(1) (2010) 12-22.
- [6] L. Wang, G. Zhang, J.-M. Zhang, Centrifuge model tests of geotextile-reinforced soil embankments during an earthquake, Geotextiles and Geomembranes, 29(3) (2011) 222-232.
- [7] A.I. Mana, G.W. Clough, Prediction of movements for braced cuts in clay, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 107(ASCE 16312 Proceeding) (1981).

بر اساس شکل ۱۶، میزان تغییرشکل افقی تاج گود در نمودار حل عددی با ضریب ۰/۷، تطابق خوبی با مقدار اندازه‌گیری شده دارد. مقادیر اصلاحی مدل HS برای ضریب ۰/۷ مدول یانگ در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از چهار مدل سانتریفیوژ می‌توان الگوی تغییرشکل دیواره در دیوار میخکوبی شده را همچون دسته‌بندی انجام شده برای تغییرشکل دیوار دیافراگمی در دو دسته قوسی و مقعر تقسیم بندی نمود. بر همین اساس با فاصله گرفتن سربار از لبه‌ی گود شکل دیواره از حالت قوسی به سمت مقعر تغییر می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج مدل‌های سانتریفیوژ ۱ و ۲ می‌توان به اهمیت مدل کردن رفتار غیرخطی خاک پیش از گسیختگی پی برد که مدل MC این پدیده را در نظر نمی‌گیرد. البته مدل MC دارای نواقص دیگری همچون موارد زیر می‌باشد:

- ۱- عدم توانایی مدل MC در مدل‌سازی سختی وابسته به تنش
- ۲- عدم توانایی مدل MC در مدل‌سازی مناسب رفتار باربرداری- بارگذاری مجدد

بر اساس نتایج مدل‌های سانتریفیوژ، مدل MC در پیش‌بینی میزان تغییرشکل قائم خاک پشت دیواره بسیار ناکارآمد می‌باشد. در حالی که مقدار به‌دست‌آمده از مدل‌های رفتاری HS و HSS به میزان اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌باشند. برای مثال، مقدار تغییرشکل قائم خاک پشت دیواره در مدل ۱ سانتریفیوژ تقریباً برابر با مقدار پیش‌بینی شده مدل رفتاری HSS می‌باشد. بر همین اساس به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی بر اساس تمامی نتایج این پژوهش، استفاده از مدل HSS برای بدست آوردن میزان تغییرشکل قائم خاک پشت گود با استفاده از رابطه‌ی تجربی (۲) و در نظر گرفتن $\gamma_{0.7}$ برابر با 10^{-5} دارای نتایج نزدیک‌تر به واقعیت می‌باشد.

میزان تغییرشکل افقی دیواره بسیار متأثر از محل قرارگیری سربار می‌باشد. در مدل سانتریفیوژ ۱ (زمانی که سربار در لبه‌ی گود قرار دارد) میزان پیش‌بینی شده از حل عددی کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده از مدل سانتریفیوژی می‌باشد. بوسیله آنالیز برگشتی و کاهش مدول یانگ با ضرب در ضریب ۰/۷، مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط حل عددی در این مدل برابر گردیدند. در مدل

- soil nail walls performance-Case study, *Geomechanics and Geoengineering*, 11(1) (2016) 1-12.
- [18] T. Bhatkar, D. Barman, A. Mandal, A. Usmani, Prediction of behaviour of a deep excavation in soft soil: a case study, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1) (2017) 10-19.
- [19] R.B. Peck, Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proc. 7th ICSMFE*, 1969, (1969) 225-290.
- [20] G.W. Clough, T.D. O'Rourke, Construction induced movements of insitu walls, in: *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE, 1990, pp. 439-470.
- [21] P.-G. Hsieh, C.-Y. Ou, Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation, *Canadian geotechnical journal*, 35(6) (1998) 1004-1017.
- [22] M. Long, Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(3) (2001) 203-224.
- [23] J. Wang, Z. Xu, W. Wang, Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7) (2009) 985-994.
- [24] P. V8, *Material Models Manual*, Delft University of Technology & PLAXIS bv, The Netherlands, (2008) 48.
- [25] T. Benz, *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences*, Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik, 2007.
- [26] F. Ahimoghadam, Investigating the factors affecting the behavior of nailing walls using centrifuges machine Master's thesis, Faculty of Civil Engineering (University of Science and Technology) (2014).
- [27] D.M. Wood, *Geotechnical modelling*, CRC press, 2003.
- [28] A. Aysen, *Soil mechanics: basic concepts and engineering applications*, CRC Press, 2002.
- [8] A.J. Whittle, Y.M. Hashash, R.V. Whitman, Analysis of deep excavation in Boston, *Journal of geotechnical engineering*, 119(1) (1993) 69-90.
- [9] R.B. Brinkgreve, Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application, in: *Soil constitutive models: Evaluation, selection, and calibration*, 2005, pp. 69-98.
- [10] R.F. Obrzud, G.C. Eng, On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice, *Numerics in Geotechnics and Structures*, (2010).
- [11] A. Lim, C.-Y. Ou, P.-G. Hsieh, Evaluation of clay constitutive models for analysis of deep excavation under undrained conditions, *Journal of GeoEngineering*, 5(1) (2010) 9-20.
- [12] P. Teo, K. Wong, Application of the Hardening Soil model in deep excavation analysis, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 5(3) (2012) 152-165.
- [13] S. Likitlersuang, C. Surarak, D. Wanatowski, E. Oh, A. Balasubramaniam, Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT, *Soils and Foundations*, 53(5) (2013) 756-773.
- [14] B.-C.B. Hsiung, S.-D. Dao, Evaluation of Constitutive Soil Models for Predicting Movements Caused by a Deep Excavation in Sands, (2014).
- [15] M. Afifipour, P. Marefvand, M.G. Estahbani, Investigation of Unreasonable Expansion in Numerical Modeling of Excavation Problems, in: *9th International Congress of Civil Engineering*, Isfahan University of Technology, 2012.
- [16] I. Rahmani, A. Golpazir, Evaluating the Effect of Selecting Constitutive Models on Prediction of the Ground Movement Adjacent to Deep Excavations JR_ROAD, (2012).
- [17] E. Zolqadr, S.S. Yasrobi, M. Norouz Olyaei, Analysis of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Khosravi, S.R. Soorani, F. Ahimoghadam, Evaluation of Constitutive Soil Models in Soil Nail Wall Using Centrifuge Model, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(1) (2020) 171-186.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14733.5728



