

## مطالعه آزمایشگاهی تغییر شکل تابع زمان دیواره میخ کوبی شده در حین عملیات گودبرداری

سیما کوهستانی اسبق سو<sup>۱</sup>، جعفر بلوری بزاز<sup>۲\*</sup>، محمود عبدالهی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۹۸/۰۳/۲۶ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۷/۱۳

### چکیده

امروزه با گسترش شهرها و افزایش جمعیت، لزوم ایجاد ساختمان‌های بلند و گودبرداری‌های عمیق برای اجرای آن‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. خاک تحت بارگذاری ثابت باگذشت زمان تغییر شکل‌هایی را تجربه می‌کند که تغییر شکل‌های تابع زمان نامیده می‌شود که در دراز مدت به لحاظ ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، رفتار گودهای پایدار سازی شده به روش میخ‌کوبی در خاک ماسه‌ای و با در نظر گرفتن اثر زمان با استفاده از تکنیک مدل‌سازی فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش عمق گودبرداری سبب افزایش تغییر مکان‌های جانبی، نشست‌های سطحی زمین پشت دیواره گود و نیز تغییر شکل‌های تابع زمان می‌گردد. همچنین توقف عملیات گودبرداری و یا رها سازی آن موجب ایجاد افزایش قابل توجه تغییر شکل‌های تابع زمان می‌گردد. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد تغییر شکل‌هایی که در طول زمان رخ می‌دهد با یک نرخ کاهشی ادامه یافته که علت آن افزایش آن، بسیج شدن تدریجی نیروها در میخ‌ها می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** مطالعه آزمایشگاهی، تغییر شکل‌های تابع زمان، میخ‌کوبی، نشست زمین، تغییر شکل دیوار

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲. دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران bolouri@um.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

یکی از مهمترین مسائل در ساخت و سازهای شهری، توجه به نگهداری از ساختمانهای موجود در مجاور گودبرداری‌ها می‌باشد. اگر حفاظت جانبی گودها در ساختمان‌های در حال احداث در نظر گرفته نشود؛ منجر به خطراتی از جمله کاهش ظرفیت باربری، نشست‌های قابل توجه و تغییر مکان‌های جانبی در سازه‌های مجاور خواهد شد. بنابراین برای جلوگیری از این مشکلات، طراحی و اجرای سیستم‌های نگهدارنده جانبی جهت ایجاد محیطی امن و پایدار برای سازه‌های مجاور ضروری به نظر می‌رسد. خاک‌ها با ویژگی‌های متفاوت، رفتارهای مختلفی با گذشت زمان از خود نشان می‌دهند. معمولاً فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی وابسته به زمان می‌تواند منجر به رفتار ترد و یا نرم شوندگی، کاهش یا افزایش مقاومت و یا تغییر در یک سری از ویژگی‌های خاک شود. علاوه بر این، تغییرات در ساختار خاک با گذشت زمان، می‌تواند بر پایداری خاک تأثیر بگذارد. خاک تحت بارگذاری ثابت با گذشت زمان تغییر شکل‌هایی را تجربه می‌کند که تغییر شکل‌های تابع زمان نامیده می‌شود. تغییر شکل‌های وابسته به زمان، بخصوص هنگامی که تغییر شکل‌های درازمدت مطرح می‌شود، در مهندسی ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارند. از آنجایی که بسیاری از گودها ممکن است در حین مراحل گودبرداری رهاسازی شوند، بنابراین بررسی و پیش بینی رفتار خاک بعد از ماه‌ها و یا سال‌ها نیز ضروری می‌باشد.

مطالعات زیادی بر روی رفتار دیوار بر اثر گودبرداری‌های عمیق صورت گرفته است (Ou et al., 1996, Ou et al., 2000b, Ou, 2006a, Kung et al., 2007, Hsiung, 2009, Wang et al., 2010). در حالی که تحقیقاتی چند بر روی جابجایی‌های زمین ناشی از گودبرداری در رس‌ها انجام شده (Hsieh and Ou, 1998, Hwang et al., Finno et al., 1989, 2007a, Hwang et al., (2007b, Long, 2001, Mana and Clough, 1981). اما تعداد کمی گودبرداری در ماسه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند (Nikolinakou et al., Hsiung, 2009, 2011). بطور کلی هنگام گودبرداری مقداری از جابجایی دیوار ممکن است بدلیل تغییر شکل کوتاه مدت اسکلت خاک و

مقداری ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان وابسته به زمان خاک باشد. لئونگ و همکارانش (Leong et al., 1996) آزمایش تراکم یک بعدی را روی خاک ماسه‌ای انجام داده و مشاهده کردند مقدار شکستگی ذرات با تداوم بار افزایش یافته که این خود می‌تواند به تغییر شکل‌های در طی زمان خاک‌های ماسه‌ای کمک نماید (یادگاری، ۱۳۹۳). مطالعات میدانی نشان داده که تغییر شکل‌های تابع زمان خاک بطور قابل توجهی به تغییر مکان‌های وابسته به زمان کمک کرده است (I. Mana and Clough, 1981, Lin et al., 2002). مطالعات اوو و همکارانش (Ou et al., 1998) نشان می‌دهد که در طول دوره انتظار (زمان تاخیر و یا توقف بین هریک از مراحل گودبرداری) تغییر مکان جانبی دیواره، نشست سطحی زمین و تغییر مکان کف گود همگی افزایش می‌یابند؛ حتی اگر روند گودبرداری متوقف باشد. علت این پدیده شاید استهلاک فشار آب اضافی یا تغییر شکل‌های تابع زمان خاک، مخصوصاً دلیل دوم می‌باشد. پدیده تغییر شکل‌های تابع زمان ممکن است به علت سینماتیک ذرات ماسه (بازآرایی ذرات، Rearrangement of the grains)، ویسکوزیته سیلیس، یا شکست و فرسایش ذرات (خرد کردن ذرات) باشد (Ching, 2019). در سالهای اخیر توجه به تحقیقات تجربی پیرامون رفتار خاک‌های دانه‌ای افزایش یافته است. ماسه‌ها بطور کلی به عنوان غیرویسکوز در نظر گرفته می‌شوند؛ رفتار وابسته به زمان از خود نشان می‌دهند. نتایج تجربی نشان داده که تغییر شکل‌های تابع زمانی قابل اغماض نبوده و می‌توانند تا 10 درصد از کرنشهای بارگذاری تک محوری برسند (Augustesen et al., 2004).

با وجود انجام تحقیقات گسترده در زمینه گودبرداری، سالانه ریزش گود خسارت جانی و مالی بیشماری را ایجاد می‌نماید بنابراین انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه امری ضروری می‌باشد. همانطور که بیان شد مطالعات کمی بر روی گودبرداری در خاک ماسه‌ای انجام شده است. در این پژوهش سعی بر آن شده است تا گودبرداری در خاک ماسه‌ای با سیستم مهاربندی میخکوبی در آزمایشگاه و در شرایط Ig مدلسازی گردیده و مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی از آنجایی که در

متر می باشد عبور نماید.

جدول ۱. ابعاد مدل آزمایشگاهی سازه نگهبان

Specifications of retaining wall	Amount in reality	Amount in model
Excavation geight	5 m	0.8 m
Dia. of the nails	0.022 m	4 mm
Nails length	6-13m	0.5, 0.7, 0.85, 1 m
Spacing of nails	1.1 m	0.18 m
Dimensions of the bearing plate	0.2 m	35 mm

## ۲-۲. چیدمان آزمایشات

در این بخش توضیحاتی پیرامون چیدمان آزمایشات از قبیل روش ساخت مدل فیزیکی، جعبه آزمایش و دیوار حائل و میخ‌ها ارائه گردیده است.

### ۲-۲-۱. روش ساخت نمونه آزمایشگاهی

به منظور ساخت مدل فیزیکی خاکریزی مرحله به مرحله، از دستگاه بارش ماسه استفاده شده و سعی بر آن بوده تا در تمامی اعماق مدل تراکم معین و یکنواخت باشد. در انجام این پژوهش از دو تراکم متوسط و خاک با تراکم بالا استفاده شده است. هنگام ساخت نمونه، خاکریزی تار رسیدن به محل قرارگیری نیل‌ها ادامه می‌یابد و سپس مطابق با شکل ۴ و توضیحات ارائه شده در جدول ۴ نیل‌ها قرار داده می‌شوند. در نهایت با خاتمه خاکریزی به ارتفاع کلی یک متر، سربار تهیه شده که در پاراگراف بعدی شرح داده شده در مجاورت گود قرار داده می‌شود. شایان ذکر است توضیح کامل‌تر در مورد دستگاه بارش ماسه و کارایی آن در پژوهش‌های عبدالهی و بلوری ارائه گردیده است، Abdollahi and Bolouri Bazaz, (2017).

### ۲-۲-۲. جعبه آزمایش

جهت رسیدن به اهداف مورد نظر در این پژوهش، مدل فیزیکی شامل یک جعبه فلزی به عنوان محیط گود به طول دو متر، عرض و ارتفاع یک متر می‌باشد. همچنین جعبه فوق

کشور ایران بسیاری از گودها بدلیل مشکلاتی در حین مراحل گودبرداری و یا پس از پایان آن رهاسازی می‌شوند، بررسی رفتار در طی زمان نیز اهمیت خود را نمایان می‌سازد. این پژوهش بر روی رفتار وابسته به زمان متمرکز شده است. انتخاب این نوع سیستم سازه نگهبان از آن رو است که علی‌رغم مزایای بالای این روش از نقطه نظر امکان پذیری فنی، هزینه و مدت ساخت، تحقیقات نسبتاً کمی در رابطه با آن و در حوزه تغییر شکل‌های تابع زمان خاک انجام گرفته است. در پژوهش حاضر سعی شده با ساخت یک مدل آزمایشگاهی، رفتار گودبرداری و تابع زمان به روش سیستم میخ کوبی در آزمایشگاه مدل نموده و رفتار گودبرداری‌های عمیق در حین گودبرداری و پس از آن در مجاورت ساختمان (با اعمال سربار معادل) مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

## ۲. توصیف مدل فیزیکی

### ۲-۱. تحلیل ابعادی

مدلسازی فیزیکی در ژئوتکنیک، ساخت مدلی از ابنیه و انجام بارگذاری لازم بر روی آن برای شبیه‌سازی پدیده‌ها بوده و برای ارزیابی صحت تحلیل‌های عددی تنش تغییرشکل و پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانگونه که قبلاً بیان شد در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی رفتار گودبرداری در خاک ماسه‌ای با استفاده از مدلسازی فیزیکی پرداخته شده است. روش‌های مدلسازی فیزیکی بر دو نوع، مدلسازی کوچک و بزرگ مقیاس در شرایط 1g و مدلسازی با دستگاه سانتریفیوژ (شرایط ng) می‌باشد. در منابع فنی روابطی جهت انتخاب صحیح نسبت ابعادی وجود دارد. رابطه شبیه‌سازی پارامتر طول در شرایط 1g، به صورت  $1/n$  بوده که در این پژوهش از ضریب مقیاس ۶ استفاده شده است. بنابراین با توجه به توضیحات فوق ابعاد مدل آزمایشگاهی سازه نگهبان مطابق با جدول ۱ انتخاب شده است. به دلیل سختی محوری پایین میلگرد به قطر چهار میلیمتر و انحنا آن هنگام نصب، از میخ‌های فلزی به قطر شش میلیمتر استفاده شد. طول میخ‌ها باید در حدی باشد که از صفحه شکست رانکین که حدود  $0/4$

پیشین که براساس مطالعات موردی و میدانی می‌باشد، استفاده گردیده است. همچنین در این انتخاب علاوه بر موارد فوق، از معیارها و توصیه‌های ارائه شده در FHWA و نیز بر مبنای تأمین ضریب اطمینان حدود ۱/۵ و تغییر شکل‌های مجاز بهره گرفته شده و نهایتاً یک فاصله میخ بهینه با توجه به تشابه ابعادی در مدل فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این پژوهش نحوه انتخاب چیدمان نیل‌ها به گونه‌ای صورت گرفته است که تغییر شکل‌های بوجود آمده در مدل فیزیکی در محدوده مجاز خود و براساس اعداد گزارش شده در پروژه‌های واقعی که ضریب اطمینان پایداری در محدوده مجاز قرار داشته‌اند، باشد. جهت ایجاد تأثیر تریق و اعمال آن در مدل آزمایشگاهی، زبری سطح میخ‌ها و افزایش اصطکاک، دور هر یک از میخ‌ها لایه‌ای ماسه به ضخامت دو میلیمتر با چسب ایجاد شده است. صفحه‌ی اتکا برای جلوگیری از برش پانچ به شکل دایروی به قطر ۳۵ میلیمتر می‌باشد. واشر روی صفحه اتکا قرار گرفته و با بستن مهره، میخ‌ها به صفحه روکش متصل می‌شوند. در شکل ۲ صفحه اتکا، مهره و واشر مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. برای جلوگیری از ریزش ماسه به داخل گود، باید از دیواره‌ای استفاده گردد. جنس این دیواره بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که خود به تنهایی مقاومتی در برابر فشارهای خاک ناشی از گودبرداری نداشته باشد. همچنین نباید انعطاف‌پذیری بالایی داشته باشد تا بر اثر فشارهای اعمالی خاک، روی آن گسیختگی موضعی رخ دهد. به منظور مشخص نمودن سختی و جنس دیواره گود، آزمایشی مطابق با شکل ۳ انجام پذیرفت. آزمایش سختی براساس رابطه (۱) بوده که این رابطه مختص تیرهای کنسولی تحت بارگذاری متمرکز می‌باشد. در این رابطه  $\Delta$  میزان تغییر مکان،  $P$  نیروی وارده،  $L$  بازوی لنگر و  $EI$  سختی دیوار می‌باشد. نتایج این آزمایش در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور نشان داده شده، در این آزمایش یک نیرو به صورت متمرکز به بالاترین نقطه دیواره می‌گردد. با افزایش گام نیروی اعمالی به دیواره، تغییر شکل‌های متناظر بوجود آمده در دیواره

دارای فضای کافی جهت بارگذاری سازه به عنوان سربار موجود در مجاورت محل گودبرداری می‌باشد. جداره‌های این جعبه توسط طلق‌های شفاف جهت مشاهده روند تغییر شکل‌ها پوشانده شده است. لازم به ذکر است که جهت مدل کردن مراحل گودبرداری، از ۱۰ دریچه به ارتفاع ۱۰ سانتیمتر در قسمت جلویی جعبه آزمایش استفاده شده است. با برداشتن هریک از این دریچه‌ها، یک مرحله از گودبرداری مدل می‌شود.

روش متداول محاسبه سربار در مجاورت گود این است که حاصل جمع بارهای مرده و زنده برای هر مترمربع از سقف یک تَن در نظر گرفته شود. با توجه به تشابه ابعادی و بارهای مرده و زنده در مجاور گود وزن هر مترمربع از سقف ۰/۱۴۳ کیلونیوتن در نظر گرفته شده است. ساختمان مورد نظر در مدل فیزیکی دارای هشت سقف بوده که با ابعاد ۰/۷۰ در ۰/۵۰ متر هر سقف مقدار سربار معادل ۱/۱۴۴ کیلونیوتن بر متر مربع است.



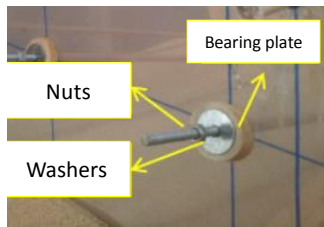
شکل ۱. جعبه آزمایش

### ۳-۲-۲. دیوار حائل و میخ‌ها

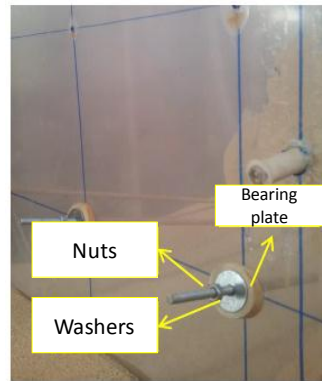
از آنجایی که میخ‌ها و توده خاک خواص متفاوتی دارند، تنش‌های ایجاد شده با پیشرفت گودبرداری در خاک، کرنش‌های مختلفی بین میخ و خاک اطراف آن ایجاد می‌کنند. براساس مطالعات نیکلسون (Ou et al., 1996)، بازه فواصل بین میخ‌ها 6 تا 10 برابر قطر میخ‌ها در ایالت متحده رایج بوده، درحالی‌که در اروپا تا 15 برابر قطر میخ‌ها استفاده شده است (Ou, 2006b). در پژوهش حاضر، نحوه انتخاب تعیین فواصل میخ‌ها با توجه به مطالعات صورت گرفته در پژوهش‌های

$$\Delta = \frac{pL^3}{3EI}$$

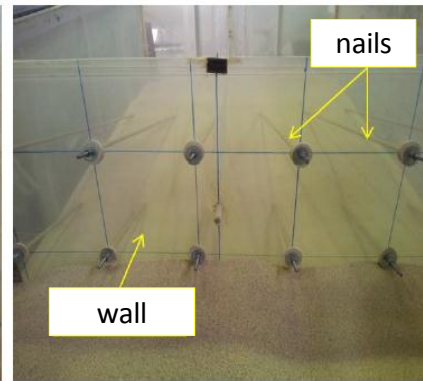
(۱) اندازه‌گیری شده و سپس با رسم منحنی نیرو-تغییر مکان سختی دیواره محاسبه می‌گردد.



(ج)

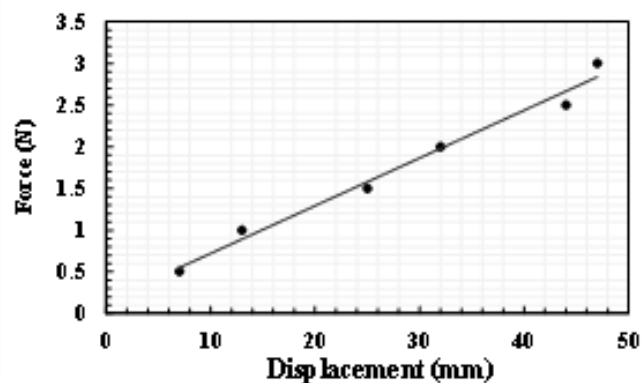


(ب)



(الف)

شکل ۲. مدل فیزیکی جهت بررسی تغییر شکل‌های تابع زمان دیواره گود (الف) میخ‌ها و تعلق (ب) صفحه اتکا، مهره و واشر (ج) صفحه اتکا



(ب)



(الف)

شکل ۳. آزمایش تعیین سختی دیواره؛ (الف) نحوه انجام آزمایش، (ب) نتیجه آزمایش

دیواره گود در انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید. در شکل ۴ جزئیات سیستم میخ‌کوبی به صورت شماتیک نشان داده شده است. قابل ذکر است که جهت گودبرداری در چهار مرحله، صفحات فلزی از محل خود برداشته شده و عملیات

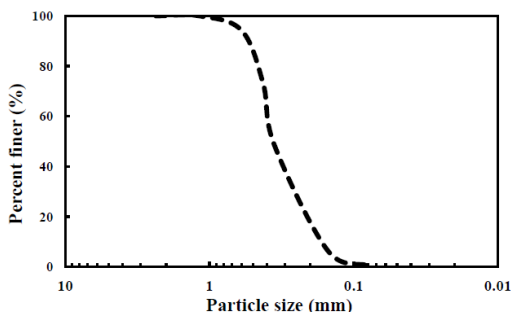
با توجه به توضیحات ارائه شده و با به کارگیری رابطه ۱، متوسط سختی دیواره در حدود  $EI = 4.2 \times 10^{-2} \text{ (kg.m)}$  محاسبه گردید. بنابراین با توجه به سختی محاسبه شده، ورق‌های از جنس پلکسی به ضخامت دو میلیمتر به عنوان

۹۹ و ۶۷/۵ درصد استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها

(Abdollahi, 2017)			
$D_{60}$ (mm)	0.4	$e_{max}$	0.94
$D_{10}$ (mm)	0.17	$e_{min}$	0.6
$C_c$	1.01	$G_s$	2.7
$C_u$	2.4		

در جدول ۲ پارامترهای  $D_{60}$ ،  $D_{10}$ ،  $e_{min}$ ،  $e_{max}$ ،  $C_c$ ،  $C_u$  و  $G_s$  به ترتیب ضریب یکنواختی، ضریب خمیدگی، نسبت تخلخل بیشینه، نسبت تخلخل کمینه، قطر مؤثر دانه‌ها و چگالی دانه‌های جامد می‌باشد.



شکل ۵. منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها (Abdollahi, 2017)

### ۳. اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها

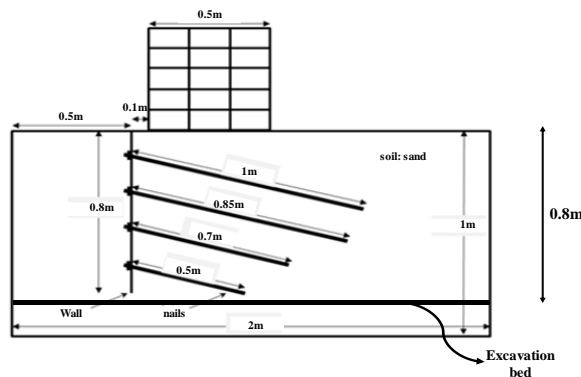
#### ۳-۱. نشست سطح زمین

در مراحل خاکریزی هنگامی که سطح خاک به تراز پنج سانتیمتری از سطح گود رسید، یک لایه از ماسه رنگی در آن ارتفاع ریخته شده و خاکریزی تا پر شدن جعبه ادامه می‌یابد. از این لایه‌ی ماسه رنگی برای اندازه‌گیری تغییر مکان قائم (نشست) استفاده شده است.

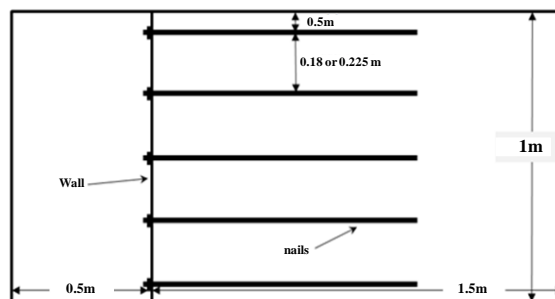
#### ۳-۲. جابجایی جانبی دیواره گود

جهت اندازه‌گیری تغییر مکان‌های جانبی دیواره از گیج‌های عقربه‌ای با دقت ۰/۱۰ میلی‌متر که در ارتفاع دیواره نصب شده‌اند، استفاده گردیده است. شکل ۶ طرح شماتیک و مدل آزمایشگاهی موقعیت قرارگیری گیج‌های اندازه‌گیری در پشت مخزن را نشان می‌دهد. برای بررسی تغییر شکل‌های تابع زمان

خاکبرداری اجرا می‌گردد. گود به ارتفاع ۰/۸ متر بوده که با چهار ردیف میخ با طول‌های متفاوت (به ترتیب ۱ متر، ۰/۸۵ متر، ۰/۷۰ متر و ۰/۵۰ متر) مهار شده است. فواصل قائم بین میخها ۰/۱۸ متر و فواصل افقی بین میخها در دو حالت ۰/۱۸ متر و ۰/۲۲۵ متر در نظر گرفته شده و با زاویه ۱۵ درجه نسبت به افق قرار گرفته‌اند.



(الف)



(ب)

### شکل ۴. تصویری شماتیک از مجموعه سیستم

خاک-میخ کوبی، (الف) مقطع عرضی (ب) پلان

### ۳-۲. خاک مورد استفاده در آزمایش

آزمایش‌ها بر روی ماسه شکسته سیلیسی استاندارد فیروزکوه به شماره ۱۶۱ انجام شده است. مشخصات مربوط به خاک مورد استفاده در جدول ۲ و نمودار دانه‌بندی آن که بر اساس ASTM 22-87 انجام شده در شکل ۵ مشاهده می‌گردد. ایجاد تراکم نسبی خاک مورد نظر در آزمایشات با استفاده از دستگاه بارش ماسه (Abdollahi and Bolouri Bazaz, 2017) ساخته شده صورت گرفته است. در انجام این آزمایشات از تراکم نسبی



پی وی سی چسبانیده شده است، متصل می‌گردد. تجهیزات مذکور در قسمتی قرار دارد که هیچ گونه عملیات گودبرداری انجام نمی‌پذیرد به عبارتی در قسمت پشت دیواره سازه نگهبان قرار دارد. شایان ذکر است که گودبرداری از قسمت جلوی دیواره انجام می‌شود.

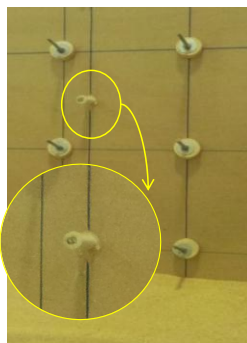
#### ۴. برنامه آزمایش‌ها

در این پژوهش جهت مطالعه رفتار تغییر شکل‌های تابع زمانی دیواره سازه نگهبان، اقدام به آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی گردید. سپس به منظور شبیه‌سازی پروژهای اجرایی و واقعی، اقدام به انجام عملیات گودبرداری مرحله‌ای و نصب میخ‌ها شده است. جدول ۳ جزئیات مراحل گودبرداری و نصب میخ‌ها را نشان می‌دهد.

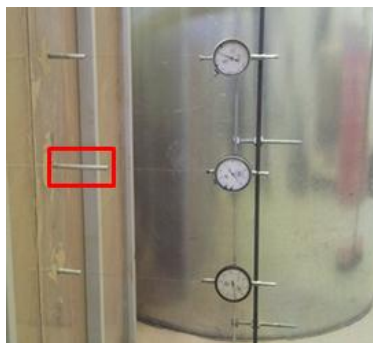
جدول ۳. جزئیات مراحل گودبرداری و نصب میخ‌ها

Excavation stage No.	Excavation depth(mm)
1	160
Install the first row of nails at a depth of 130 mm	-
2	340
Install the second row of nails at a depth of 130 mm	-
3	520
Install the third row of nails at a depth of 130 mm	-
4	700
Install the fourth row of nails at a depth of 130 mm	-
5	800

مراحل گودبرداری با تأخیر (اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها در زمان توقف گودبرداری در هر مرحله) انجام شده است. در واقع با ثابت ماندن شرایط، با گذشت زمان معین، قرائت مقدار تغییر مکان‌ها همچنان ادامه یافته است. همچنین جهت انتقال تغییر مکان حاصله از میخ‌ها به گیج‌های اندازه‌گیری از تعدادی سیم مفتولی نازک با انعطاف‌پذیری کم که توسط غلاف به دیوار متصل شده، بعنوان رابط بین دیوار و گیج‌ها استفاده گردیده است. از آنجایی که سیم‌های مفتولی مورد استفاده نازک بوده و امکان دارد در حین آزمایش تحت اثر فشار خاک و سربار گسیخته شود، از لوله‌های آلومینیومی با قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر به عنوان غلاف برای این سیم‌ها استفاده شده است (شکل ۶). از طرف دیگر این غلاف باعث کاهش اصطکاک و در نتیجه افزایش دقت در آزمایش‌ها می‌گردد. به منظور ثبت دقیق تغییر شکل‌های دیواره گود توسط گیج‌ها و همچنین عدم اتصال صلب غلاف آلومینیومی به دیواره از یک لوله پی وی سی در محل اتصال آن به دیواره استفاده شده است. هنگام تغییر شکل جانبی دیوار سیم مفتولی باعث ثبت میزان تغییر شکل در گیج‌ها می‌شود و اما در حین جابجایی جانبی دیواره، لوله آلومینیومی درون جعبه نیز به تبعیت از دیواره تحت کشش یا فشار قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از این مسأله در محل اتصال لوله آلومینیومی به دیواره از لوله پی وی سی به قطر خارجی ۰/۱۲ متر و به طول ۰/۱ متر استفاده شده است که سیم مفتولی به دکمه‌ای که به بخش جلویی لوله



(ج)



(ب)



(الف)

Gauge No.	Distance from soil surface (mm)
1	0
2	220
3	400
4	580
5	760

شکل ۶. (الف) موقعیت قرارگیری گیج‌ها، (ب) غلاف آلومینیومی، (ج) محل اتصال لوله آلومینیومی به دیواره

تغییر مکان جانبی دیواره و نشست سطحی زمین حین حفاری گود مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در قسمت قبل بیان گردید، پس از پایان هر مرحله از گودبرداری جهت مشاهده اثرات تغییر شکل های تابع زمان در حین مراحل گودبرداری، دو مرحله متوالی از گودبرداری با وقفه انجام شده است. جابجایی دیواره به دلیل تغییر شکل های تابع زمان خاک برابر است با جابجایی بخش فوقانی دیواره در مدت زمانی که گودبرداری در حال انجام نیست (Chen et al., 2014).

#### ۱-۱-۵. جابجایی جانبی دیواره گود

از آنجایی که در آزمایش ها مراحل گودبرداری با تأخیر ۲ ساعت از هم انجام گرفته (در زمان توقف عملیات گودبرداری)، جابجایی جانبی دیواره در حین عملیات گودبرداری می تواند ناشی از گودبرداری و تغییر شکل های تابع زمان خاک باشد. شکل ۷ تغییر مکان های جانبی آنی ناشی از گودبرداری آزمایش های انجام شده را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با پیشرفت مراحل گودبرداری تغییر مکان ها به طور پیوسته افزایش می یابند.

جابجایی دیواره در ابتدا به صورت طره ای بوده اما با پیشرفت گودبرداری به شکل طره ای پایه دار تبدیل می شود. بیشینه تغییر مکان جانبی دیواره ( $\delta_{hm}$ ) در پایان آخرین مرحله گودبرداری مشاهده می گردد. رفتار مشاهده شده در پژوهش حاضر در نتایج سایر محققین نیز مشاهده شده است (Ou et al., 2002, Lin et al., 2007, Hsiung, et al., 2000b, 2009, Hsiung et al., 2016).

بیشینه تغییر مکان های جانبی در بخش فوقانی دیواره مشاهده می گردد. جدول ۵ مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی آنی دیواره پس از پایان گودبرداری ( $\delta_{hm}$ ) و نسبت بیشینه تغییر مکان جانبی آنی دیواره به عمق گودبرداری ( $\delta_{hm}/H$ ) آزمایش های انجام شده را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد، مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی آنی دیواره در بازه ۰/۷۹ الی ۳/۳۷ میلی متر (۰/۱۰ الی ۰/۴۲ درصد از کل عمق گودبرداری) است. این پارامتر بدون بعد بوده تا امکان مقایسه آن با مطالعات محققان پیشین فراهم شود) می باشد.

به منظور بررسی رفتار تغییر شکل های تابع زمانی سازه نگهبان در حین عملیات گودبرداری در مقیاس آزمایشگاهی، سه پارامتر مهم فواصل افقی بین میخ ها، وجود سربار در مجاورت گودبرداری و نیز اثر تراکم خاک، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش ۸ آزمایش انجام شده که مشخصات هر آزمایش با کد مربوط به آن در جدول ۴ آورده شده است. حرف اول به عنوان عبارت خلاصه شده آزمایش (Test) با T نمایش داده شده است. حرف دوم در کد هر آزمایش که M یا H می باشد به ترتیب بیانگر تراکم متوسط خاک (۶۷/۵ درصد) یا تراکم بالای خاک (۹۹ درصد) در آزمایش می باشد. حرف سوم S وجود سربار در مجاورت گود و N عدم وجود سربار را نشان می دهد. رقم آخر در کدگذاری نیز بیانگر فواصل افقی بین میخ ها (بر حسب میلی - متر) است.

جدول ۴. مشخصات آزمایش ها

No.	Test code	Horizontal spacing(mm)	Surcharge	Density
1	TMS180	180	S	Medium
2	THS180	180	S	Dense
3	TMS225	225	S	Medium
4	THS225	225	S	Dense
5	TMN180	180	N	Medium
6	THN180	180	N	Dense
7	TMN225	225	N	Medium
8	THN225	225	N	Dense

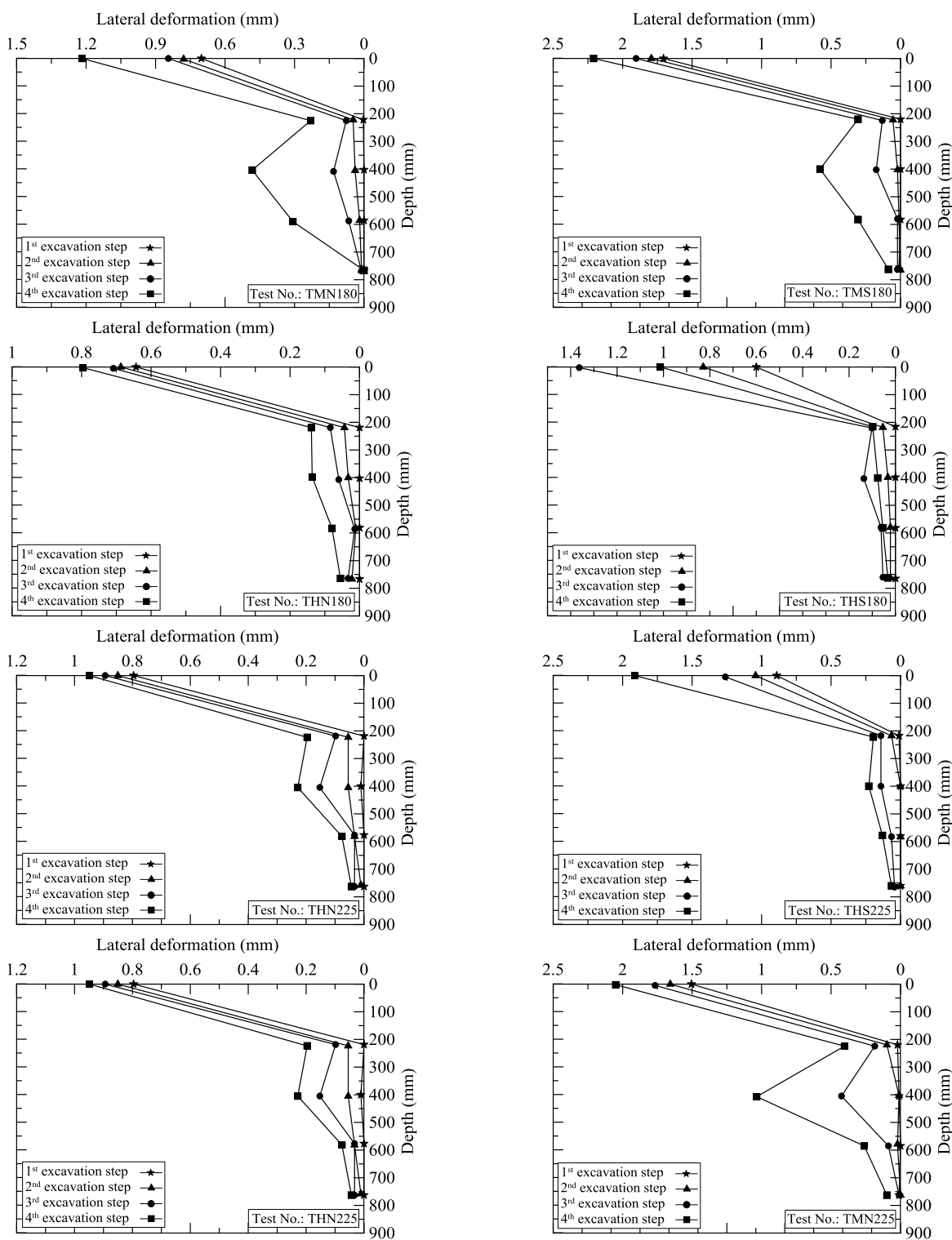
#### ۵. پاسخ زمین در اثر گودبرداری

دیواره گود به دلیل تغییرات تنش در زمان گودبرداری، تغییر شکل داده و تغییر شکل هایی را نیز به زمین های و ساختمان های مجاور اعمال می کند. در ادامه به بررسی و ارزیابی بیشتر این پدیده ها پرداخته شده است.

#### ۱-۵. تغییر شکل ها در حین عملیات گودبرداری

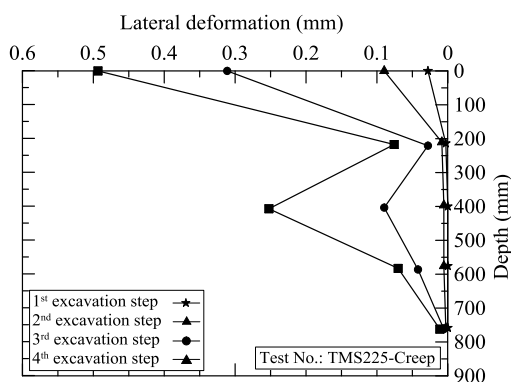
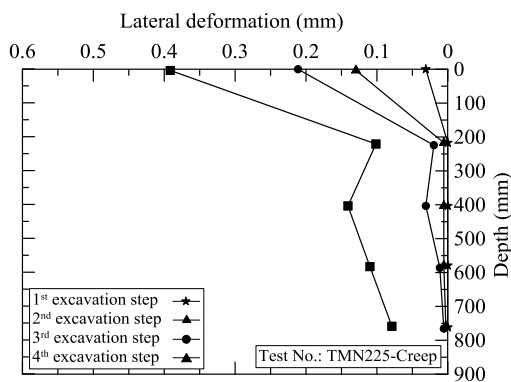
در این بخش رفتار زمین در اثر گودبرداری در قالب





شکل ۷. تغییر مکان های جانبی آبی ناشی از گودبرداری

زمان تأخیر در مراحل گودبرداری مربوط به آزمایش‌های TMN225 و TMS225 می‌باشد. قابل ذکر است که این تغییر مکان‌ها فقط ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان بوده و در محاسبه آن‌ها تغییر مکان‌های آنی ناشی از گودبرداری لحاظ نشده است.



شکل ۸. تغییر مکان‌های جانبی ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان حین عملیات گودبرداری (در زمان توقف گودبرداری در هر مرحله)

جدول ۷ مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان ( $\delta_{hmcb}$ ) در مراحل گودبرداری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عمق گودبرداری، مقادیر تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر اثر تغییر شکل‌های تابع زمان با افزایش عمق گودبرداری افزایش می‌یابد. در گودبرداری تا ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر، مقادیر بیشینه

جدول ۵. بیشینه تغییر مکان جانبی آنی در بخش فوقانی دیواره بعد از پایان گودبرداری

No.	Test code	$\delta_{hm}(mm)$	$\delta_{hm}/H(\%)$
1	TMS180	2.22	0.28
2	THS180	1.36	0.17
3	TMS225	3.37	0.42
4	THS225	1.93	0.24
5	TMN180	1.21	0.15
6	THN180	0.79	0.10
7	TMN225	2.04	0.26
8	THN225	0.94	0.12

جدول ۶ نسبت بیشینه تغییر مکان جانبی آنی دیواره به عمق گودبرداری در بخش فوقانی دیواره حاصل از مطالعات پژوهش حاضر و سایر محققین را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مشاهده می‌گردد که نتایج به دست آمده در این پژوهش با گزارش‌های حاصل از مطالعات موردی و صحرایی سایر محققین مطابقت نسبی خوبی دارد.

جدول ۶. نسبت بیشینه تغییر مکان جانبی آنی دیواره به عمق گودبرداری

$\delta_{hm}/H(\%)$	Type of retaining wall	Excavation depth (m)	researchist
0.4	Nailing	3.25	Wong et al., 1997
0.54	Diaphragm	46	Ou et al., 2000a
0.1-0.3	Diaphragm	50	Lin et al., 2002
0.05-0.25	various	5-37	Long, 2001
0.3	Diaphragm	60	Hsiung, 2009
0.1-0.4	nailing	0.8	Present research

از آنجایی که آزمایش‌ها شامل مراحل گودبرداری با تأخیر دو ساعت از هم صورت پذیرفته، جابجایی جانبی دیواره در حین عملیات گودبرداری می‌تواند ناشی از گودبرداری و تغییر شکل‌های تابع زمان خاک باشد. شکل ۸ نشان‌دهنده تغییر مکان‌های جانبی ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان در

جدول ۷. مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی ناشی از تغییر شکل های تابع زمان در مراحل گودبرداری

No.	Test code	$\delta_{hmcb}(mm)$				$\delta_{hmcb}/H(\%)$			
		Stage No.1	Stage No.2	Stage No.3	Stage No.4	Stage No.1	Stage No.2	Stage No.3	Stage No.4
		130 mm	310 mm	490 mm	800 mm	130 mm	310 mm	490 mm	800 mm
1	TMS180	0.05	0.08	0.13	0.42	0.006	0.01	0.016	0.053
2	THS180	0.17	0.32	0.34	0.4	0.021	0.04	0.043	0.05
3	TMS225	0.03	0.09	0.31	0.49	0.004	0.011	0.039	0.061
4	THS225	0.08	0.26	0.34	0.44	0.033	0.04	0.043	0.055
5	TMN180	0.02	0.12	0.13	0.37	0.003	0.015	0.016	0.046
6	THN180	0.03	0.05	0.06	0.12	0.004	0.006	0.008	0.015
7	TMN225	0.03	0.13	0.21	0.39	0.004	0.016	0.026	0.049
8	THN225	0.01	0.02	0.08	0.2	0.001	0.003	0.01	0.025

جدول ۸. میزان افزایش بیشینه تغییر مکان جانبی ناشی از تغییر شکل های تابع زمان در مرحله آخر گودبرداری در حین عملیات گودبرداری

No.	Test code	$\delta_{hm}(mm)$	$\delta_{hmcb}(mm)$	$\Delta\delta_{hm}(\%)$
1	TMS180	2.22	0.42	19
2	THS180	1.36	0.4	29
3	TMS225	3.37	0.49	15
4	THS225	1.93	0.44	23
5	TMN180	1.21	0.37	31
6	THN180	0.79	0.12	15
7	TMN225	2.04	0.39	19
8	THN225	0.94	0.2	21

جانبی ناشی از تغییر شکل های تابع زمان در حین عملیات گودبرداری و در مرحله آخر گودبرداری در بخش فوقانی دیوار را نشان می دهد. مشاهده می گردد پدیده تغییر شکل های تابع زمان حداکثر باعث افزایش ۳۱ درصدی تغییر مکان های جانبی در حین عملیات گودبرداری شده است. بنابراین جابجایی دیواره ناشی از تغییر شکل های تابع زمان خاک باید در حین ساخت و طراحی مورد توجه قرار گیرد.

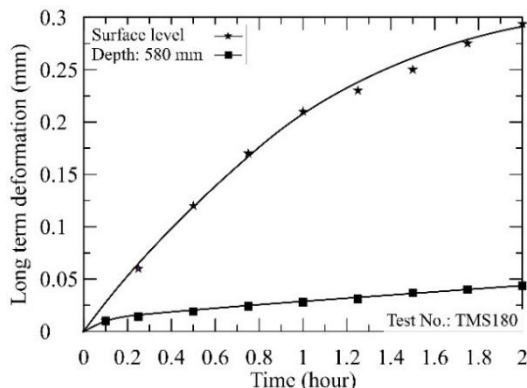
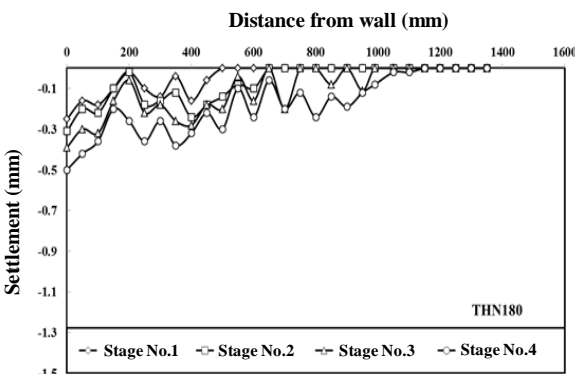
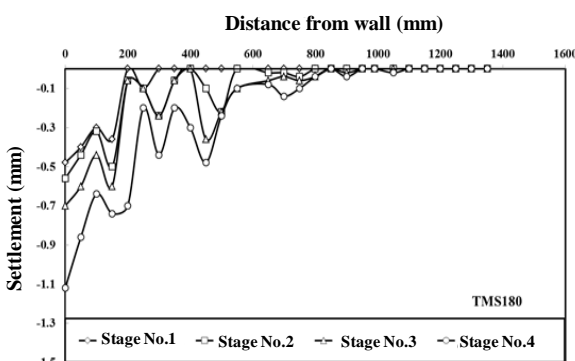
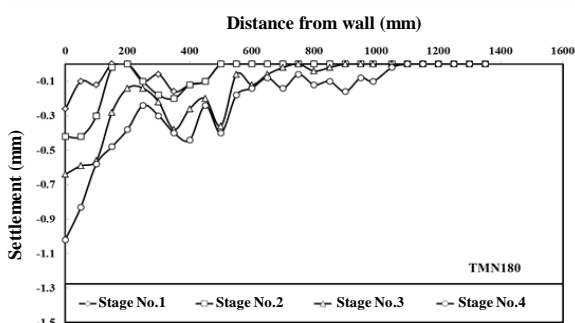
همچنین با توجه به اهمیت تغییر شکل های دراز مدت (در صورت توقف و رهاسازی گود) آزمون TMS180 پس از اتمام گودبرداری، تغییر شکل های ایجاد شده در سطح زمین و عمق ۵۸۰ میلیمتر از سطح زمین تا ۱۲ روز (۲۸۸ ساعت) اندازه گیری شد که نتایج آن در شکل ۹ نمایش داده شده است. این شکل به وضوح نشان می دهد که تغییر شکل هایی که در طول زمان رخ می دهد با یک نرخ کاهشی ادامه یافته که علت آن بسیج شدن تدریجی نیروها در میخ که این خود

تغییر مکان جانبی ناشی از تغییر شکل های تابع زمان در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۲۸ میلی متر، در گودبرداری تا ارتفاع ۳۱۰ میلی متر در بازه ۰/۰۲ تا ۰/۳۲ میلی متر، در گودبرداری تا ارتفاع ۴۹۰ میلی متر در بازه ۰/۰۶ تا ۰/۳۴ و در گودبرداری تا ارتفاع ۸۰۰ میلی متر در بازه ۰/۱۲ تا ۰/۴۹ می باشد. همچنین نسبت مقدار بیشینه تغییر مکان جانبی ناشی از تغییر شکل های تابع زمان به عمق گودبرداری ( $\delta_{hmcb}/H$ ) به ترتیب در مرحله اول گودبرداری در بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۳۳ درصد، در مرحله دوم گودبرداری در بازه ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۴ درصد، در مرحله سوم گودبرداری در بازه ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۴۳ درصد و در نهایت در مرحله چهارم گودبرداری در بازه ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۶۱ درصد می باشد.

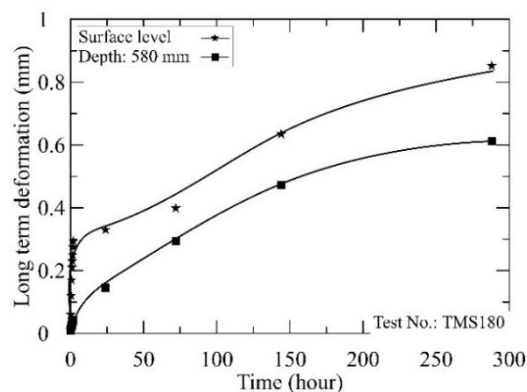
جدول ۸ مقایسه تغییر مکان های جانبی آبی و تغییر مکان های

گودبرداری نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد با پیشرفت مراحل گودبرداری، مقادیر بیشینه تغییر مکان قائم (بیشینه نشست زمین) افزایش می‌یابد. این مطلب در مشاهدات سایر محققین نیز گزارش شده است (Wang et al., Ou et al., 2000a, 2010, (Hsiung, 2009

ناشی از بسیج شدن تدریجی اصطکاک میان میخ و مصالح خاکی است. همچنین بسیج شدن نیروها در میخ تابعی از جابجایی جانبی دیواره گود بوده که با افزایش این جابجایی در طول زمان نیروهای مقاوم در میخ به طور کامل بسیج شده و از جابجایی بیشتر دیواره جلوگیری می‌نماید.



(الف)

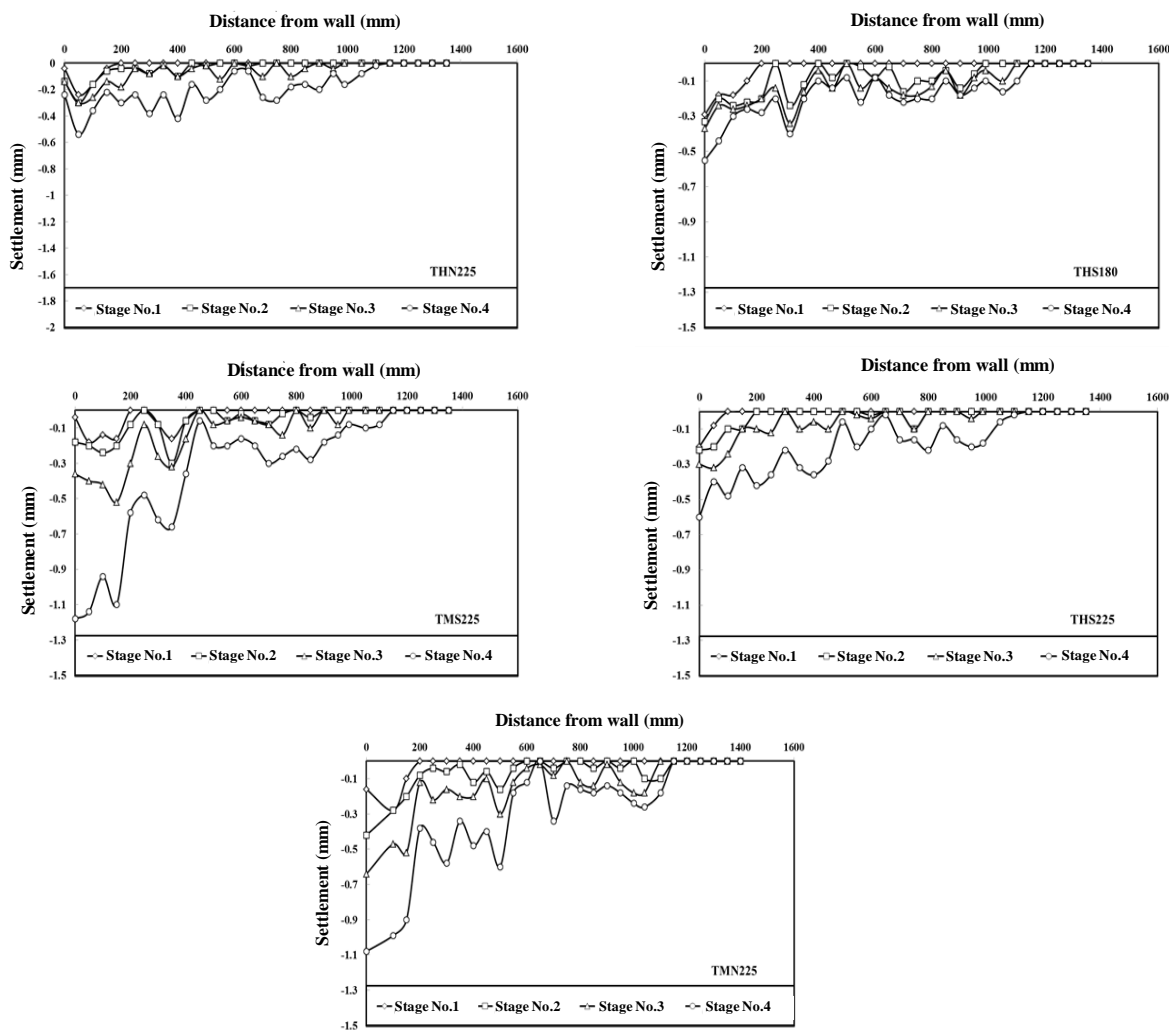


(ب)

شکل ۹. اندازه‌گیری تغییر شکل‌های جانبی در مقابل زمان در زمان؛ الف) دو ساعت پس از آخرین مرحله گودبرداری و ب) ۱۲ روز پس از آخرین مرحله گودبرداری

### ۲-۱-۵ نشست سطحی زمین

با شروع گودبرداری و تغییر شکل جانبی دیواره، خاک پشت دیواره به سمت جلو و پایین حرکت کرده و سطح زمین دچار نشست می‌شود. شکل ۱۰ نشست‌های آبی ناشی از گودبرداری در آزمایش‌های انجام شده را در حین عملیات



شکل ۱۰. نشست‌های آنی ناشی از گودبرداری در حین عملیات گودبرداری

درصد بوده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش به نتایج هسیونگ (Hsiung, 2009) نزدیک است.

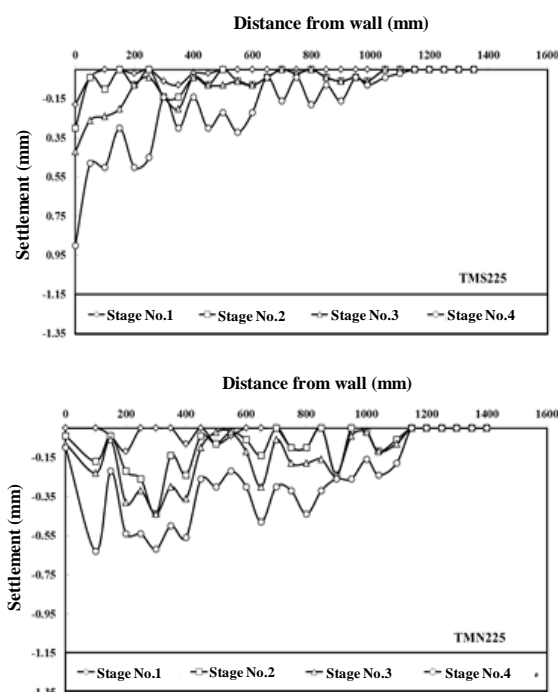
جدول ۹. مقادیر بیشینه نشست آنی زمین در حین عملیات گودبرداری

No.	Test code	$\delta_{vm}(mm)$	$\delta_{vm}/H(\%)$
1	TMS180	1.12	0.14
2	THS180	0.55	0.07
3	TMS225	1.18	0.15
4	THS225	0.6	0.08
5	TMN180	1.02	0.13
6	THN180	0.50	0.06
7	TMN225	1.08	0.14
8	THN225	0.54	0.08

جدول ۹ نشان‌دهنده بیشینه نشست آنی زمین ( $\delta_{vm}$ ) و نسبت بیشینه نشست آنی زمین به عمق گودبرداری ( $\delta_{vm}/H$ ) در حین عملیات گودبرداری است. بیشینه نشست آنی زمین در بازه ۰/۵ الی ۱/۱۸ میلی‌متر و نسبت بیشینه نشست آنی نشست زمین به عمق گودبرداری در بازه ۰/۰۶ الی ۰/۱۵ درصد است. براساس مطالعات وانگ و همکارانش (Wang et al., 2010) نسبت بیشینه نشست زمین به عمق گودبرداری در بازه ۰/۱ الی ۰/۸ درصد به دست آمده است. در مطالعات موردی مورمن (Moormann, 2004) در خاک‌های ماسه ای این نسبت در بازه ۰/۲۵ الی ۱ درصد قرار گرفته است. هم-چنین مقادیر این نسبت در مطالعات موردی هسیونگ (Hsiung, 2009) در خاک‌های ماسه‌ای در بازه ۰/۰۹ الی ۰/۱۴

با پیشرفت گودبرداری، تغییر مکان‌های جانبی ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان افزایش یافته و به تبع آن نشست‌های زمین ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان نیز افزایش می‌یابد. در جدول ۱۰ مقادیر بیشینه نشست ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان برای مراحل گودبرداری نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش عمق گودبرداری، مقادیر نشست‌ها افزایش می‌یابد. در گودبرداری تا ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر، مقادیر بیشینه نشست ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان ( $\delta_{hmcb}$ ) در بازه ۰ تا ۰/۱ میلی‌متر، در گودبرداری تا ارتفاع ۳۱۰ میلی‌متر در بازه ۰/۳۰ تا ۰/۶ میلی‌متر، در گودبرداری تا ارتفاع ۴۹۰ میلی‌متر در بازه ۰/۱۶ تا ۰/۵۶ میلی‌متر و در گودبرداری تا ارتفاع ۸۰۰ میلی‌متر در بازه ۰/۳۰ تا ۰/۹۰ میلی‌متر باشد. همچنین نسبت مقدار بیشینه نشست ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان به عمق گودبرداری ( $\delta_{vmcb}/H$ ) به ترتیب در مرحله اول گودبرداری در بازه ۰ تا ۰/۱۳ درصد، در مرحله دوم گودبرداری در بازه ۰/۰۸ تا ۰/۳۸ درصد، در مرحله سوم گودبرداری در بازه ۰/۲۰ تا ۰/۷۰ درصد و در نهایت در مرحله چهارم گودبرداری در بازه ۰/۳۸ تا ۰/۱۱۲ درصد می‌باشد.

نشست‌های سطحی ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان در مراحل گودبرداری مربوط به دو آزمایش TMN225 و TMS225، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نشست‌های سطحی زمین پشت دیواره گود ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان حین عملیات گودبرداری همانگونه که مشاهده می‌گردد در حین عملیات گودبرداری و

جدول ۱۰: مقادیر بیشینه نشست ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان در مراحل گودبرداری

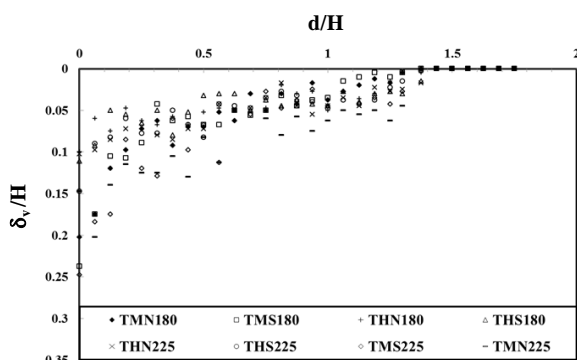
No.	Test code	$\delta_{hmcb}(mm)$				$\delta_{hmcb}/H(\%)$			
		Stage No.1	Stage No.2	Stage No.3	Stage No.4	Stage No.1	Stage No.2	Stage No.3	Stage No.4
		130 mm	310 mm	490 mm	800 mm	130 mm	310 mm	490 mm	800 mm
1	TMS180	0.04	0.3	0.56	0.79	0.005	0.038	0.07	0.099
2	THS180	0.08	0.1	0.24	0.34	0.01	0.013	0.03	0.043
3	TMS225	0.1	0.22	0.56	0.9	0.013	0.028	0.07	0.112
4	THS225	0	0.06	0.16	0.58	0	0.008	0.02	0.073
5	TMN180	0.02	0.22	0.38	0.6	0.003	0.028	0.048	0.075
6	THN180	0.1	0.18	0.26	0.3	0.013	0.023	0.033	0.038
7	TMN225	0	0.17	0.23	0.63	0	0.021	0.029	0.079
8	THN225	0.04	0.2	0.36	0.54	0.005	0.025	0.045	0.068

از تغییر شکل‌های تابع زمان در حین عملیات گودبرداری و

در جدول ۱۱ مقایسه نشست‌های آبی و نشست‌های ناشی



به عمق گودبرداری ( $\delta_v/H$ ) و فاصله از دیوار بدون بعد (فاصله محل نشست از دیواره به عمق گودبرداری  $d/H$ ) پس از پایان گودبرداری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توزیع نشست از لبه گود به فاصله‌ای حدود  $1/4$  برابر ارتفاع گود از لبه گود گسترش پیدا کرده است. مقدار حداکثر نشست بدون بعد  $0.25$  می‌باشد.



شکل ۱۲. نشست زمین مجاور دیواره در پایان گودبرداری

در شکل ۱۳ نتایج حاصل از تحقیقات محققین مختلف با توجه به مقادیر نشست بدون بعد و فاصله از دیوار بدون بعد ارائه شده است. پک (Peck, 1969) حدود و شکلی برای نشست زمین ارائه داد. بر اساس این شکل منطقه ۱ مربوط به خاک‌های ماسه ای و رس‌های نرم تا سخت می‌باشد. سیئه و اوو در سال ۱۹۹۸ پروفیلی برای نشست رس‌های نرم تا سخت ارائه دادند که با نتایج پک مطابقت داشت. در سال ۲۰۰۹ نیز پروفیلی برای ماسه خشک واقع در منطقه ۱ نمودار پک پیشنهاد دادند (Laefer et al., 2009). همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، نتایج این پژوهش نیز در ناحیه ۱ واقع شده و با نتایج پک یکسان است. پروفیل پیشنهادی نگارنده براساس آزمایش‌های انجام شده تقریباً بین نتایج دو محقق دیگر است. هم‌چنین قابل ذکر است که بیشینه نشست زمین در گودبرداری در مجاورت دیواره رخ می‌دهد، پروفیل نشست زمین به صورت مثلی بوده و با نتایج مطالعات موردی اوو و همکارانش (Ou et al., 1993) نیز مطابقت دارد.

در مرحله آخر گودبرداری در محلی که حداکثر نشست رخ می‌دهد، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد پدیده تغییر شکل‌های تابع زمان حداکثر باعث افزایش ۱۰۰ درصدی نشست‌های آبی در حین عملیات گودبرداری شده است. پس تأخیر در انجام مراحل گودبرداری سبب افزایش نشست زمین می‌گردد و در صورت چشم پوشی می‌تواند سبب آسیب به ساختمان‌ها و تجهیزات مجاور شود.

جدول ۱۱. میزان افزایش بیشینه نشست ناشی از تغییر شکل‌های تابع زمان در انتهای عملیات گودبرداری

No.	Test code	$\delta_{vm}(mm)$	$\delta_{vmcb}(mm)$	$\Delta\delta_{vm}(\%)$
1	TMS180	1.12	0.79	71
2	THS180	0.55	0.34	62
3	TMS225	1.18	0.9	76
4	THS225	0.6	0.58	96
5	TMN180	1.02	0.6	59
6	THN180	0.5	0.3	60
7	TMN225	1.08	0.63	58
8	THN225	0.54	0.54	100

## ۶. محل قرارگیری بیشینه تغییر مکان جانبی

بر اساس نمودارهای ارائه شده در بخش‌های قبل، در تمامی آزمایش‌ها بیشینه تغییر مکان جانبی دیواره ناشی از گودبرداری و تغییر شکل‌های تابع زمان در حین عملیات، در بخش فوقانی دیواره ایجاد شده است. این نتیجه منطبق بر مشاهدات اوو و همکارانش (Ou et al., 1993) است که اظهار داشتند؛ "در خاک‌های سفت (مثل ماسه)، بیشینه تغییر شکل دیواره، عمدتاً در بالای سطح گودبرداری ایجاد می‌گردد". در مطالعات وانگ و همکارانش (Wong et al., 1997) نیز بیش‌ترین تغییر مکان جانبی، در تمامی مراحل در تاج دیواره بوده است. هم‌چنین جابجایی زیر تاج دیوار به تدریج تقریباً به صفر در قسمت پنجه دیوار کاهش یافته است.

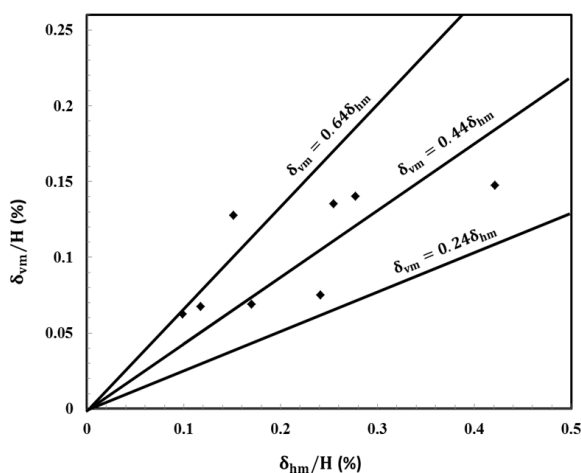
## ۷. الگوی نشست سطحی زمین و بیشینه نشست

شکل ۱۲ رابطه بین نشست بدون بعد (مقادیر نشست زمین

جانبی دیواره را نشان می‌دهد که در این پژوهش با استفاده از روش رگرسیونی جهت تخمین مقدار نشست با استفاده از تغییرمکان جانبی ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، مقادیر بیشینه نشست زمین در بازه  $0.24\delta_{hm}$  الی  $0.64\delta_{hm}$  است که مقدار متوسط آن  $0.44\delta_{hm}$  می‌باشد.

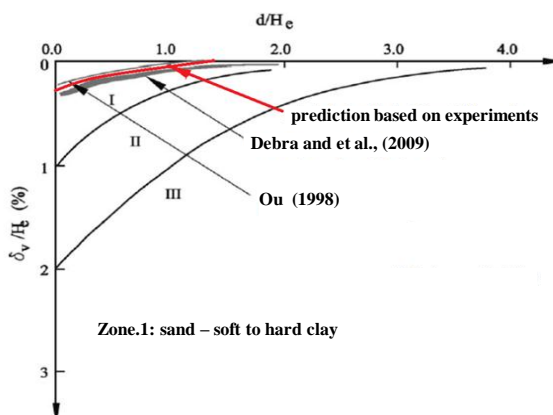
جدول ۱۲. بیشینه نشست آنی سطح زمین به بیشینه تغییرمکان آنی جانبی

NO.	Test code	$\delta_{vm}/\delta_{hm}$
1	TMS180	0.5
2	THS180	0.4
3	TMS225	0.35
4	THS225	0.31
5	TMN180	0.84
6	THN180	0.63
7	TMN225	0.53
8	THN225	0.57



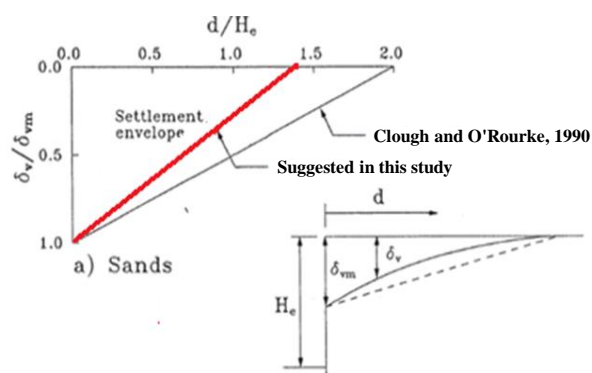
شکل ۱۵. رابطه بین تغییرمکان جانبی و نشست زمین

جدول ۱۳ نسبت بیشینه نشست آنی زمین به بیشینه تغییرمکان جانبی آنی دیواره حاصل از این پژوهش و سایر محققین را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مشاهده می‌گردد نسبت به دست آمده در این تحقیق از گزارش‌های حاصل از مطالعات موردی و صحرایی سایر محققین کم‌تر است.



شکل ۱۳. نشست زمین مجاور گود

کلاف و اورورک در سال ۱۹۹۰ براساس مطالعات موردی بسته به نوع خاک نمودارهایی برای پروفیل نشست خاک پیشنهاد دادند. طبق نتایج آن‌ها در گودبرداری زمین‌های ماسه-ای یا رس سخت، نشست زمین از نوع مثلی ایجاد می‌شود. پروفیل پیشنهادی آن‌ها برای نشست خاک ماسه‌ای در شکل ۱۴ نشان داده شده است (Hsieh and Ou, 1998). در این پژوهش منطقه تأثیر تا  $1/4$  برابر عمق گودبرداری گسترش یافته است. بنابراین نگارنده پروفیل پیشنهادی دیگری ارائه داده که در شکل مذکور مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۴. روش پیشنهادی برای تخمین نشست خاک

#### ۸. رابطه بین بیشینه تغییرمکان جانبی و نشست

جدول ۱۲ نشان دهنده مقادیر نسبت بیشینه نشست آنی زمین به بیشینه تغییرمکان جانبی آنی دیواره ( $\delta_{vm}/\delta_{hm}$ ) می‌باشد. شکل ۱۲ رابطه بین بیشینه نشست زمین و بیشینه تغییرمکان

جدول ۱۳. نسبت بیشینه نشست آنی زمین به بیشینه تغییر مکان جانبی آنی دیواره

$\delta_{vm}/\delta_{hm}$	Type of retaining wall	Depth excavation (m)	Type of soil	researchist
0.5-1	Diaphragm, pilling	13-35	-----	1998 Hsieh and Ou,
0.5-1	Diaphragm	60	Sand	Hsiung, 2009
0.24-0.64	Nailing	0.8	Sand	Present research

بنابراین افزایش نیروهای مماسی بین ذرات و لغزش ذرات دانست.

۵) پدیده تغییر شکل های تابع زمان سبب افزایش قابل توجه در تغییر مکان های جانبی در حین عملیات گودبرداری به مدت زمان دو ساعت و تغییر مکان های جانبی در حین گودبرداری شده است. تغییر شکل های اضافی قابل توجه بوده و بایستی در پروژه های اجرایی در نظر گرفته شود.

۶) اندازه گیری ها نشان داد که تغییر شکل هایی که در طول تغییر شکل های تابع زمان رخ می دهد با یک نرخ کاهشی ادامه می یابد که علت آن افزایش سختی خاک است. زمانی که در طول تغییر شکل های تابع زمان تغییر شکل ها رخ می دهند، ذرات بازآرایی اندکی متحمل می شوند که باعث کاهش مولفه های مماسی و افزایش مولفه های عمودی در نیروهای مماسی می شود. در نتیجه سرعت لغزش بین ذره ای کاهش یافته و باعث کاهش نرخ تغییر شکل های تابع زمان می گردد (Kuhn and Mitchell, 1993).

۷) نتایج نشان می دهد که وجود سربار در مجاورت گود باعث افزایش مقادیر تغییر مکان ها شده است. به نظر می رسد که علت آن در تغییر مکان های آنی افزایش فشار جانبی خاک و ایجاد تغییر مکان جهت رفع این فشار و در تغییر مکان های تغییر شکل های تابع زمانی افزایش نیروی مماسی و لغزش ذرات خاک می باشد. با افزایش فواصل میخ ها سختی مهارها در واحد عرض کاهش یافته و بنابراین مقادیر تغییر مکان های آنی و تغییر شکل های تابع زمانی افزایش می یابد. با افزایش تراکم خاک، حفرات بین ذرات کم شده، هم چنین چسبندگی و اصطکاک بین ذرات افزایش می یابد و بنابراین مقادیر تغییر مکان های آنی و تغییر شکل های تابع زمانی کاهش می یابد.

## ۹. نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار روش میخ کوبی برای پایدارسازی گود و اثر زمان با استفاده از تکنیک مدل سازی فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه به بررسی نتایج این پژوهش اشاره شده است.

۱) نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده در این پژوهش نشان می دهد که با افزایش عمق گودبرداری در سیستم میخ کوبی به دلیل افزایش فشار جانبی خاک و بنابراین تغییر مکان دیواره جهت رفع این فشار، تغییر مکان های جانبی افزایش می یابند. با تغییر مکان جانبی دیواره خاک پشت دیواره به سمت جلو و پایین حرکت کرده و سطح زمین دچار نشست می شود. بنابراین با افزایش عمق گودبرداری نشست سطح زمین نیز افزایش می یابد.

۲) پدیده تغییر شکل های تابع زمان ممکن است به علت بازآرایی ذرات و یا شکست و فرسایش ذرات (خرد شدن ذرات) باشد. در آزمایش های انجام شده مقدار تنش ها در حدی نیست که سبب شکست ذرات شود بنابراین به نظر می رسد علت تغییر شکل های تابع زمان و تغییر مکان های ناشی از آن به دلیل بازآرایی ذرات باشد. مطابق با مطالعات صورت گرفته، پدیده تغییر شکل های تابع زمان حداکثر باعث افزایش ۳۱ درصدی تغییر مکان های جانبی و ۱۰۰ درصدی نشست های آنی در حین عملیات گودبرداری شده است. لذا تأخیر در انجام مراحل گودبرداری سبب افزایش تغییر مکان های جانبی و نشست زمین شده و در صورت چشم پوشی می تواند سبب آسیب به ساختمان ها و تجهیزات مجاور شود.

۳) افزایش عمق گودبرداری سبب افزایش تغییر مکان های جانبی و نشست های ناشی از تغییر شکل های تابع زمان می گردد. علت این پدیده را می توان افزایش فشار جانبی خاک و

## منابع

- یادگاری، ش. ۱۳۹۳. بررسی رفتار خزشی خاک ماسه‌ای مسلح شده با الیاف ژئوستتیک در شرایط آزمایشگاهی. دانشگاه محقق اردبیلی.
- Abdollahi, M. 2017. Experimental Study of the Excavation Using Pile-Anchorage System. Degree of Master of Science in Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad-Iran.
- Abdollahi, M. & Bolouri Bazaz, J. 2017. Reconstitution OF Sand Specimens Using a Rainer System. International Journal of Engineering.
- Augustesen, A., Liingaard, M. & Lade, P. V. 2004. Evaluation of Time-Dependent Behavior of Soils. International Journal of Geomechanics, 4, 137-156.
- Chen, S.-L., Ho, C.-T. & Gui, M.-W. 2014. Diaphragm wall displacement due to creep of soft clay. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 167, 297-310.
- Ching, P. 2019. Creep in Sands : A Study of Time Dependent Deformation of Reclamation Sand Fill Under Constant Effective Stress. HKU Theses Online (HKUTO).
- Finno, R. J., Atmatzidis, D. K. & Perkins, S. B. 1989. Observed Performance of a Deep Excavation in Clay. Journal of Geotechnical Engineering, 115, 1045-1064.
- Hsieh, P.-G. & Ou, C. Y. 1998. Shape of Ground Surface Settlement Profiles Caused by Excavation. Canadian Geotechnical Journal, 35, 1004-1017.
- Hsiung, B.-C. B. 2009. A Case Study on the Behaviour of a Deep Excavation in Sand. Computers and Geotechnics, 36, 665-675.
- Hsiung, B. C. B., YANG, K.-H., AILA, W. & HUNG, C. ۲۰۱۶. Three-dimensional Effects of a Deep Excavation on Wall Deflections in Loose to Medium Dense Sands. Computers and Geotechnics, 80, 138-151.
- Hwang, R. N., MOH, Z.-C. & WANG, C. H. 2007a. Performance of Wall Systems during Excavation for Core Pacific City. Journal of GeoEngineering, 2, 53-60.
- Hwang, R. N., Moh, Z. C. & Wang, C. H. 2007b. Toe Movements of Diaphragm Walls and Correction of Inclinometer Readings. Journal of GeoEngineering, 2, 61-71.
- I. Mana, A. & Clough, G. W. 1981. Prediction of Movement for Braced Cut in Clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 107, 759-777.
- Kuhn, M. R. & Mitchell, J. K. 1993. New Perspectives on Soil Creep. Journal of Geotechnical Engineering, 119, 507-524.
- Kung, G. T., Juang, C. H., Hsiao, E. C. & HASHASH, Y. M. 2007. Simplified Model for Wall Deflection and Ground-Surface Settlement Caused by Braced Excavation in Clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 731-747.
- Laefer, D. F., Ceribasi, S., Long, J. H. & Cording, E. J. 2009. Predicting RC Frame Response to Excavation-Induced Settlement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135, 1605-1619.
- Leong, E., CHEONG, H. & Pan, T. 1996. A Device for the Measurement of Sub-Surface Ground Vibrations. Geotechnical Testing Journal, 19, 286-296.
- Lin, H. D., OU, C. Y. & Wang, C. C. 2002. Time-Dependent Displacement of Diaphragm Wall Induced by Soil Creep. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 25, 223-231.
- Long, M. 2001. Database for Retaining Wall and Ground Movements due to Deep Excavations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127, 203-224.
- Mana, A. I. & Clough, G. W. 1981. Prediction of Movement for Braced Cut in Clay. Journal of the Geotechnical Engineering Division 107, 759-7.

- Moormann, C. 2004. Analysis of Wall and Ground Movements Due to Deep Excavations in Soft Soil Based on a New Worldwide Database. *Soil and Foundations*, 44, 87-98.
- Nikolinakoum, M. A., Whittle, A. J., Savidis, S. & Schran, U. 2011. Prediction and Interpretation of the Performance of a Deep Excavation in Berlin Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, 1047-1061.
- Ou, C.-Y. 2006a. *Deep Excavation: Theory and Practice*, Netherlands, Taylor & Francis.
- Ou, C.-Y. 2006b. *Deep Excavation: Theory and Practice*. Netherlands: Taylor & Francis.
- Ou, C.-Y., CHiou, D.-C. & Wu, T. S. 1996. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122, 337-345.
- Ou, C.-Y., Hsieh, P.-G. & CHiou, D. C. 1993. Characteristics Of Ground Surface Settlement During Excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 758-767.
- Ou, C.-Y., Liao, J.-T. & CHeng, W.-L. 2000a. Building Response and Ground Movements Induced by a Deep Excavation. *Géotechnique*, 50, 209-220.
- Ou, C.-Y., Liao, J.-T. & Lin, H. D. 1998. Performance of Diaphragm Wall Constructed Using Top-Down Method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 798-808.
- Ou, C.-Y., SHiau, B.-Y. & Wang, I. W. 2000b. Three-dimensional Deformation Behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) Excavation Case History. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 438-448.
- Peck, R. B. 1969. Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 225-325.
- Wang, J. H., Xu, Z. H. & Wang, W. D. 2010. Wall and Ground Movements due to Deep Excavations in Shanghai Soft Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 985-994.
- Wong, I. H., Low, B. K., Pang, P. Y. & Raju, G. V. R. 1997. Field Performance of Nailed Soil Wall in Residual Soil. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 11, 105-112.