

Investigating the effect of the third dimension (model length) on wall inclination and settlement of a vertical trench using small-scale physical modeling

Ali Jamshidi¹, Mohammad Sharifipour^{2*}

1- Ph. D Student, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Due to the high land volume in urban areas, maximum-slope excavation has become an inseparable part of the construction of a building. The sensitive nature of the excavation operation in terms of cost and safety requires an accurate knowledge of the soil's behavior, making it an important research field. Most of studies investigate the soil's behavior using numerical methods, which are accompanied by a certain level of inaccuracy. To sidestep the unavoidable errors associated with numerical methods, this study uses a small-scale physical modeling methodology to investigate soil behavior. The phased excavation of an unsupported vertical sandy soil trench has been experimentally modeled using three small-scale physical models with/without an externally applied load. Three models with different lengths and constant cross-sections were constructed to assess the effects of length (the third dimension) on the trench's deformation and stability. The results show that during excavation with no external loading, increasing the model's length does not significantly increase horizontal and vertical deformations. However, in tests in which the system was subjected to an applied load, decreasing the length caused substantially larger vertical and horizontal deformations in the soil. Increasing the models' length-to-height ratio decreased the discrepancies among the deformations created during loading. In other words, increasing the length caused the deformations of the models to converge toward a similar value. It was observed that the 3D-to-2D deformation ratios are dependent on the load applied to the trench. These ratios decreased as the model approached failure.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.276941.2390

*Corresponding author: Mohammad Sharifipour
Email address: sharifipour@razi.ac.ir

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 March 2021

Revise Date: 03 July 2021

Accept Date: 04 September 2021

Keywords: Excavation
Sandy soil
Physical modeling
Small-scale
Third dimension

بررسی تأثیر بعد سوم (طول مدل) در مقادیر انحراف دیواره و نشست‌های مجاور یک گود قائم با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس

علی جمشیدی^۱، محمد شریفی‌پور^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار ژئوتکنیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

گودبرداری با شیب حداکثر در ساخت و سازه‌های امروزه در مناطق شهری به دلیل ارزش بالای زمین به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. شناخت دقیق رفتار خاک حین گودبرداری، به دلیل حساسیت و اهمیت بالای این عملیات از دو دیدگاه ایمنی و اقتصاد، همواره مورد توجه محققین این عرصه بوده است. پژوهش‌های انجام شده در این راستا نیز عمدتاً با استفاده از روش‌ها و نرم‌افزارهای عددی انجام شده است. در این تحقیق به منظور پرهیز از خطاهای گریزناپذیر مدل‌سازی‌های عددی در پیش‌بینی رفتار خاک، از روش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس استفاده گردیده است. گودبرداری مرحله‌ای یک ترانشه قائم مهار نشده در یک خاک ماسه‌ای، با و بدون حضور سربار با ساخت سه مدل فیزیکی، مدل‌سازی شده است. مدل‌های فیزیکی، با مقطع عرضی ثابت و سه طول متفاوت، به منظور بررسی اثر طول (بعد سوم) ایجاد شدند. بر اساس نتایج بدست آمده، مشاهده شد که حین گودبرداری (بدون حضور سربار)، تغییرشکل‌های افقی و قائم، با افزایش طول مدل، مقدار کمی افزایش داشته است اما هنگام بارگذاری، عکس این روند مشاهده گردید. حین بارگذاری، مدل‌های با طول کمتر نسبت به مدل‌های طول‌تر تغییرشکل‌های به مراتب بزرگتری را نشان دادند و در بار کمتری نیز گسیخته شدند. تفاوت بین مقادیر تغییرشکل‌ها حین بارگذاری، با افزایش نسبت طول به ارتفاع مدل‌ها، کاهش داشت؛ به بیان دیگر، تغییرشکل مدل‌ها، با افزایش طول مدل، تمایل به همگرا شدن را از خود نشان دادند. مشاهده شد که نسبت تغییرشکل‌های مدل در حالت سه‌بعدی به حالت دوبعدی، به میزان بار اعمال شده به گود نیز بستگی دارد؛ به نحوی که با نزدیک شدن به حالت گسیختگی، این مقدار روند کاهشی در پیش‌گرفت.

کلمات کلیدی: گودبرداری، خاک ماسه‌ای، مدل‌سازی فیزیکی، کوچک‌مقیاس، بعد سوم.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.276941.2390	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.276941.2390	۱۴۰۱/۳/۳۱	۱۴۰۰/۶/۱۳	۱۴۰۰/۶/۱۳	۱۴۰۰/۴/۱۲	۱۳۹۹/۱۲/۲۶
				*نویسنده مسئول: محمد شریفی‌پور sharifipour@razi.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، گودبرداری در پروژه‌های عمرانی و به‌طور خاص در ساخت و سازه‌های شهری به دلیل ارزش بالای زمین در کلان شهرها به منظور بهره‌برداری بیشتر از زمین، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در مناطق شهری به دلیل وجود ساختمانهای مجاور و تأسیسات شهری در مجاورت گود، خاکبرداری غالباً بصورت قائم انجام می‌شود که این امر، اجرای عملیات را مخاطره‌آمیزتر می‌نماید. با توجه به وقوع خسارات جبران‌ناپذیر جانی و مالی در اثر ریزش گودها، شناخت دقیق رفتار خاک حین حفاری، امری بسیار مهم و حساس می‌باشد [۱]. از طرفی به دلیل پیچیدگی‌های موجود در رفتار خاک، تأثیر هندسه و سربار در رفتار گود از منظر ضریب اطمینان و تغییرشکل‌های افقی و قائم، اساساً مقوله گودبرداری، موضوعی پیچیده در علم مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد؛ به نحوی که توجه محققین این عرصه را در سنوات اخیر به شدت به خود جلب نموده است. تجزیه و تحلیل‌های دوبعدی به دلیل همگرایی سریع‌تر نتایج و سهولت در مدل‌سازی، نسبت به مدل‌های عددی سه بعدی از مقبولیت بیشتری نزد مهندسان برخوردار است اما باید توجه داشت که عملیات حفاری و گودبرداری، اصولاً مسائل سه‌بعدی هستند و باید تا آنجا که ممکن است مشابه وضعیت واقعی بررسی شوند [۲].

با توجه به نوع گودبرداری در محیط‌های شهری که عمدتاً از نوع محدود و به شکل مستطیلی بوده و در این شرایط فرض حالت کرنش‌مسطح که فرض اصلی در مدل‌سازی‌های دوبعدی می‌باشد، برقرار نیست، قطعاً مدل‌های دوبعدی نتایجی به دور از واقعیت خواهند داشت و در این شرایط، لزوم مدل‌سازی سه‌بعدی بیش‌ازپیش به چشم می‌خورد. از طرفی با توجه به پیچیدگی‌های موجود در رفتار خاک از جمله غیر خطی بودن خاک در کرنش‌های کوچک و ویژگی ناهمسانگردی آن، حتی مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های سه بعدی نیز نمی‌توانند عملکرد کاملاً درستی در پیش‌بینی رفتار خاک داشته باشند [۳].

در این پژوهش به منظور حصول دقت بیشتر و پرهیز از خطاهای ناگزیر مدل‌سازی‌های عددی به دلیل پیچیدگی رفتار خاک حتی در حالت سه‌بعدی، از روش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس استفاده شده است. در این مدل‌سازی‌ها عملیات گودبرداری قائم در یک خاک ماسه‌ای با حداکثر انطباق بر واقعیت و با لحاظ نمودن اثر بعد سوم با سه طول مختلف مطالعه شده است.

۲- مرور ادبیات فنی

با پیشرفت فن‌آوری و افزایش توان محاسباتی کامپیوترها، از سال ۱۹۹۰ به بعد مطالعات در مورد تأثیر بعد سوم در حفاری‌ها خصوصاً بررسی اثر گوشه آغاز گردید. اوآو همکاران از جمله پیشگامان بررسی اثر بعد سوم در گودبرداری‌ها می‌باشند. آنها نسبت کرنش صفحه‌ای (PSR) را برای تعیین مقدار اثر گوشه سه بعدی در حفاری تعریف کردند. PSR به عنوان جابجایی افقی دیواره در حالت سه‌بعدی (δ_{3D}) نسبت به جابجایی افقی دیواره در حالت دوبعدی (δ_{2D}) تعریف می‌شود [۴]:

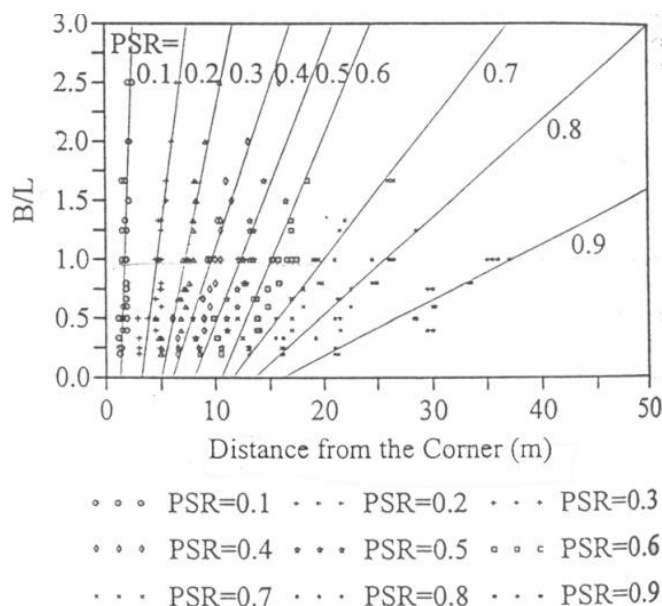
$$PSR = \frac{\delta_{3D}}{\delta_{2D}} \quad (1)$$

هرچه این نسبت بیشتر باشد، اثر گوشه کمتر می‌شود و وقتی برابر یک می‌باشد، شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار است. با توجه به مطالعات پارامتری عددی اجزای محدود آنان روی عرض و طول‌های مختلف گود و سپس مقایسه نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی در شرایط یکسان، یک نمودار برحسب نسبت PSR با نسبت طول گود به عرض گود (L/B) و فاصله از گوشه توسعه یافت (شکل ۱). آنها استدلال کردند که در این زمینه، می‌توان نتایج سه‌بعدی را بر اساس نتایج دوبعدی و با ضرب در نسبت PSR برآورد کرد. روش ارائه شده توسط او و همکاران، توسط محققان دیگر مانند فیننو^۳ و همکاران [۵] تعمیم یافت؛ به نحوی که علاوه بر جابجایی افقی، امکان برآورد نشست مجاور گود نیز فراهم گردید.

1 Plane Strain

2 Ou

3 Finno



شکل ۱: نمودار PSR بر حسب نسبت (B/L) و فاصله از گوشه [۴].

ز دراکویچ^۴ و همکاران در تحقیق خود به بررسی عددی یک گود مهار شده با سیستم دیوار دیافراگمی با ابعاد محدود پرداختند. آنها در مدل سازی دوبعدی، هم از حالت کرنش صفحه‌ای و هم از تقارن محوری استفاده نمودند و نتایج را با تحلیل‌های عددی سه‌بعدی مقایسه کردند. آنها گزارش نمودند که تغییر شکل‌های افقی در وسط ضلع بزرگتر یک گود مستطیلی انطباق بیشتری با نتایج تحلیل‌های کرنش صفحه‌ای داشته و در راستای بعد کوچکتر و همچنین در گوشه‌ها با نتایج تقارن محوری سازگاری بیشتری دارد [۶].

لین^۵ و همکاران مطالعه‌ای در مورد اثر گوشه در پروژه بیمارستان راجویچ بانکوک انجام دادند. رویکرد آنها برای ارزیابی اثر گوشه بر اساس روش ارائه شده توسط او و همکاران (۱۹۹۶) پایه‌گذاری شده بود. نتایج آنها نشان داد که روش PSR فقط تغییر شکل بیش از حد پیش‌بینی شده در تجزیه و تحلیل عددی دوبعدی را اندکی کاهش می‌دهد و نتایج هنوز هم با نتایج اندازه‌گیری میدانی تفاوت معنی‌داری دارد. آنها علت این تفاوت را در عددی بودن تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی در روش PSR عنوان کردند؛ چراکه برخی از رفتارهای پیچیده خاک مانند غیر خطی بودن خاک در کرنش‌های کوچک و ویژگی ناهمسانگردی خاک بر نتایج عددی تأثیر می‌گذارد. آنها همچنین دامنه تأثیر اثر گوشه را تا ۳ برابر عمق حفاری از گوشه عنوان نمودند [۳].

وو^۶ و همکاران با ثبت مقادیر تغییر شکل‌های افقی و نشست در چندین گود مهاربندی شده با سیستم دیوار دیافراگمی بیان نمودند که نشست در گوشه‌ها بین ۲۰ تا ۶۰ درصد نشست در وسط گود می‌باشد [۷].

رضوی^۷ و همکاران با ساخت یک مدل عددی سه‌بعدی و اعتبارسنجی آن با استفاده از یک سیستم میخگذاری ابزاربندی شده در پروژه تحقیقاتی کلاتره^۸ در فرانسه، به بررسی تفاوت سطح گسیختگی در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده پرداختند. از آنجا که طول عمود بر صفحه (بعد سوم) در نظر گرفته شده در مدل سه‌بعدی آنها نسبت به سایر ابعاد مدل، مقدار کمی بود، سطح لغزشی مشابه حالت دوبعدی به‌وقوع پیوست [۸].

⁴ Zdravkovic

⁵ Lin

⁶ Wu

⁷ Razavi

⁸ Clousterre

شیوائی و جهان‌اندیش^۹ یک گود با ارتفاع متغیر ۱۰ الی ۱۳ متر را در شیراز که با استفاده از سیستم بلوک و مهار (ARB)، مسلح شده بود، بررسی نمودند. آنها پس از ساخت یک مدل عددی سه‌بعدی و کالیبراسیون آن، ضمن بررسی پارامتریک ابعاد، فاصله و چیدمان بلوک‌ها بر پاسخ دیوار، به تأثیر قابل توجه وجود گوشه روی کاهش تغییر شکل‌های افقی دیواره اشاره نمودند [۹].

احمدی و احمدی^{۱۰} در مطالعه موردی یک گود با عمق ۲۲ متر در تهران با پشتیبانی شمع‌های نگهدارنده^{۱۱} و مهارها^{۱۲} همراه با مدل‌سازی عددی دوبعدی و سه‌بعدی دریافتند که تجزیه و تحلیل دوبعدی همیشه انحراف دیواره، به ویژه در فاصله نزدیکتر به گوشه را بیش از حد پیش‌بینی می‌کند و طراحی بر اساس آن می‌تواند غیر اقتصادی باشد. آنها همچنین با مقایسه دو مدل رفتاری مور-کلمب^{۱۳} و خاک سخت‌شونده^{۱۴} دریافتند که مدل سخت‌شونده، پیش‌بینی‌های بهتری از انحراف دیوار در مقایسه با مدل مور-کلمب ارائه می‌دهد [۲].

هیونگ و یانگ^{۱۵} تغییر شکل‌های افقی دیواره‌ی یک حفاری عمیق در مرکز جاکارتا را با استفاده از انحراف‌سنج‌های نصب شده در بدنه و همچنین شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی، مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از مطالعه‌ی پارامتری، نسبت کرنش صفحه‌ای (PSR) را تعیین کردند. در مقایسه با مقادیر مشابه بدست آمده برای خاک رس تاپیه، این مطالعه نشان داد که مقدار PSR برای خاک رس جاکارتا که سخت‌تر از خاک رس تاپیه است، بیشتر است. در واقع می‌توان گفت که نسبت کرنش صفحه‌ای نه تنها توسط اثر گوشه سه‌بعدی بلکه توسط سختی خاک زیرسطحی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین ملاحظه گردید، با افزایش فاصله از گوشه‌ها و کاهش نسبت B/L مقادیر PSR افزایش می‌یابند [۱۰].

۳- روش تحقیق (مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس)

روش مدل‌سازی فیزیکی، بنا به دلایل متعدد جزء دقیق‌ترین روش‌های مدل‌سازی سازه‌های ژئوتکنیکی می‌باشد که در مطالعه حاضر از آن استفاده گردیده است. مطالعه همه‌جانبه یک گود با ملحوظ نمودن کلیه بخش‌های تأثیرگذار بر رفتار آن، از جمله محاسن مدل‌سازی فیزیکی می‌باشد. این دسته از آزمایش‌ها امکان مشاهده کیفی پدیده‌ها، شکل‌گیری مکانیزم‌ها، پاسخ کلی سازه، تغییر شکل‌های ایجاد شده و بعضاً گسیختگی‌ها و خرابی‌های محتمل را به محقق می‌دهد. این آزمایش‌ها به دو دسته عمده آزمایشات 1g و آزمایشات ng تقسیم بندی می‌شوند. در آزمایشات 1g انجام آزمایشات تحت شتاب گرانش g انجام می‌شود و در آزمایشات ng با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ^{۱۶} شتاب گرانش را به ng افزایش می‌دهند [۱۱].

روش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس در محیط 1g علاوه بر امتیازات و محاسن اشاره شده، دارای محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌هایی نیز می‌باشد. از جمله این موارد؛ عدم امکان معادل نمودن کلیه پارامترهای مؤثر در مدل واقعی و مدل فیزیکی می‌باشد. از دیگر محدودیت‌های این روش، وجود پارامترها و در نتیجه رفتارهای تابع تنش همه‌جانبه در خاک می‌باشد که اگر سطح تنش در مسأله‌ای خیلی بزرگ باشد، مدل‌های 1g می‌توانند خطاهای قابل توجهی داشته باشند زیرا در این مدل‌ها، تنش‌های همه‌جانبه‌ی کوچکی اعمال می‌گردد؛ بدیهی‌ست در این مسائل استفاده از مدل‌های سانتریفیوژ نسبت به این مدل‌ها اولویت دارند [۱۱].

در آزمایش‌های مدل 1g، قوانین تشابه، با در نظر گرفتن کاهش سطح تنش‌ها، پارامترهای مدل و نمونه واقعی را به یکدیگر مرتبط می‌سازند. اما حتی با استفاده از چنین روابطی نیز، وجود خطاهایی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. ایائی^{۱۸} با نوشتن معادلات تعادل توانست ضرایب مقیاس را بدست آورد. وی در ادامه با فرض مستقل بودن ضریب مقیاس هندسی (λ)، ضریب مقیاس چگالی خاک ($\lambda\rho$) و ضریب مقیاس کرنش خاک ($\lambda\varepsilon$) بین مدل و نمونه اصلی، ضرایب مقیاس پارامترهای مختلف را به شرح ستون دوم جدول ۱ ارائه نمود. در صورتی

⁹ Shivaiei & Jahanandish

¹ Anchored Reaction Blocks

¹ Ahmadi & Ahmadi

¹ Soldier Piles

¹ Anchors

¹ Mohr-Coulomb

¹ Hardening Soil

¹ Hsiung & Yang

¹ Centrifuge

¹ lai

0

1

2

3

4

5

6

7

8

که چگالی خاک در نمونه واقعی و مدل یکسان در نظر گرفته شود ($\lambda\rho = 1$)، ضریب تشابه کرنش، مجذور ضریب تشابه هندسی بوده ($\lambda^{0.5}$) و بنا بر این روابط فوق بصورت ساده‌تر مطابق ستون سوم جدول ۱ ارائه می‌شود [۱۲].

مقیاس مناسب مدل فیزیکی باید چنان تعیین شود که نخست مدل خیلی بزرگ نباشد به نحوی که کار کردن با آن سخت نشود و دوم اینکه مدل نباید خیلی کوچک باشد تا اثر مقیاس موجب تفاوت رفتار مدل و نمونه واقعی گردد [۱۱]. از آنجا که ارتفاع متداول گودهای مهم و با خطر زیاد در مناطق شهری مطابق جدول ۱-۳-۷ و ۲-۷-۳ مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان [۱۳] به ترتیب بین ۶ تا ۲۰ متر و ۹ تا ۲۰ متر (متوسط ۱۴ متر) می‌باشد، مدل‌سازی فیزیکی یک گود با ارتفاع ۱۴ متر مدنظر قرار داده شده است. از طرفی با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و تجهیزاتی موجود، ارتفاع حداکثر باکس‌های مدل‌سازی فیزیکی در اکثر مراکز و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی معمولاً به ۱۲۰ سانتی‌متر محدود می‌گردد. با توجه به محدودیت‌های فوق و همچنین با بررسی مقالات مرتبط با موضوع مدل‌سازی فیزیکی در محیط 1g [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]، در نهایت ضریب مقیاس برابر با ۲۰ در نظر گرفته شد. از سوی دیگر با توجه به دهانه‌ی آزاد گود در محیط‌های شهری و به‌منظور بررسی اثر طول، عرض‌های ۳۵، ۷۰ و ۱۴۰ سانتی‌متری در نظر گرفته شد که به ترتیب معرف دهانه‌ی آزاد ۷ متری، ۱۴ متری و ۲۸ متری گود بوده که به‌طور معمول در محیط‌های محدود شهری حفاری می‌شود. بعد دیگر مدل نیز که ۸۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بر اساس ارتفاع آزاد مدل یعنی ۷۰ سانتی‌متر و وجود بار در نواحی نزدیک به دهانه‌ی گود که به نوعی سطح گسیختگی را تعریف و محدود می‌کند، لحاظ شده است. با در نظر گرفتن ضریب مقیاس هندسی برابر ۲۰ یعنی $\lambda = 20$ ، ضرایب مقیاس پارامترهای اصلی، به شرح ستون چهارم جدول ۱ محاسبه می‌گردد.

۴- مشخصات مصالح و روش ساخت

در تحقیق حاضر از ماسه شکسته سیلیسی شماره ۱۶۱ فیروزکوه که از دانه‌بندی یکنواختی برخوردار بوده و در ایران توسط محققین برجسته این عرصه (قلندرزاده^۹ و همکاران) به‌وفور مورد استفاده قرار گرفته‌است [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۸]، استفاده شده است. پس از انجام آزمایش دانه‌بندی روی این مصالح، نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۲ ترسیم شده است. در سیستم طبقه‌بندی متحد نام این خاک، ماسه با دانه بندی بد (SP) می‌باشد. درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ این مصالح نیز ۰٫۴۷ درصد می‌باشد. مصالح مذکور با درصد رطوبت ۶٫۲٪، بطور کامل مخلوط شده و با وزن مخصوص 1.54 gr/cm^3 در ۹ لایه ۱۰ سانتی‌متری به روش تراکم با حجم ثابت تراکم گردید.

جدول ۱: ضرایب تشابه آزمایشات مدل فیزیکی در میدان 1g [۱۲].

کمیت مورد بررسی	ضرایب تشابه در حالت کلی	ضرایب تشابه در حالت	ضرایب تشابه در تحقیق حاضر
x	طول	λ	20
ρ	چگالی خاک	$\lambda\rho$	1
ε	کرنش خاک	$\lambda\varepsilon$	4.47
p	فشار آب حفره‌ای	$\lambda\lambda\rho$	20
u	جابجایی خاک	$\lambda\lambda\varepsilon$	89.44
EI	صلبیت خمشی در واحد طول	$\lambda^4\lambda\rho/\lambda\varepsilon$	35777
EA	صلبیت محوری در واحد طول	$\lambda^2\lambda\rho/\lambda\varepsilon$	89.44
n	تخلخل خاک	1	1
t	زمان	$(\lambda\lambda\varepsilon)^{0.5}$	9.46

¹ Ghalandarzadeh

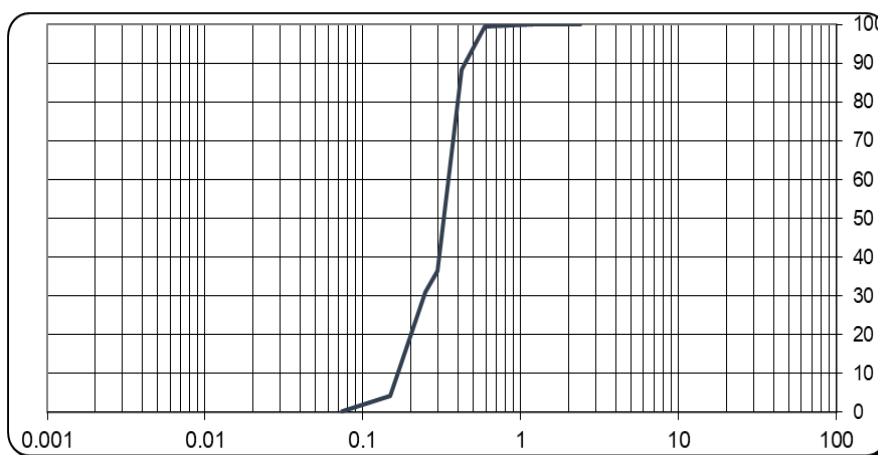
برای بررسی تأثیر بعد سوم که هدف اصلی این پژوهش می‌باشد، در مجموع، سه مدل با ابعاد مختلف ساخته شد. در این مدل‌ها، ابعاد مقطع عرضی مدل، یکسان و مطابق شکل ۳ ایجاد گردید. بعد عمود بر صفحه (که در اینجا با عنوان طول نام‌گذاری می‌شود) نیز به ترتیب ۳۵، ۷۰ و ۱۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد (شکل ۴).

به منظور مدل‌سازی ساخت مرحله‌ای، با استفاده از الوارهای صلب چوبی، قالب‌هایی به عرض ۱۰ سانتیمتر ساخته شد و به نحو مناسب به بدنه اصلی جعبه مدل متصل گردید و در هر مرحله از گودبرداری، یک ردیف از قالب‌های چوبی باز گردید تا در نهایت، ترانشه موردنظر به عمق نهائی یعنی ۷۰ سانتیمتر برسد. در شکل‌های ۵ الی ۷ نمونه‌ای از مراحل گودبرداری مرحله‌ای برای مدل‌ها با طول‌های مختلف به تصویر کشیده شده است. در شکل ۷ نمای کلی جعبه و قاب مدل فیزیکی نیز نشان داده شده است.

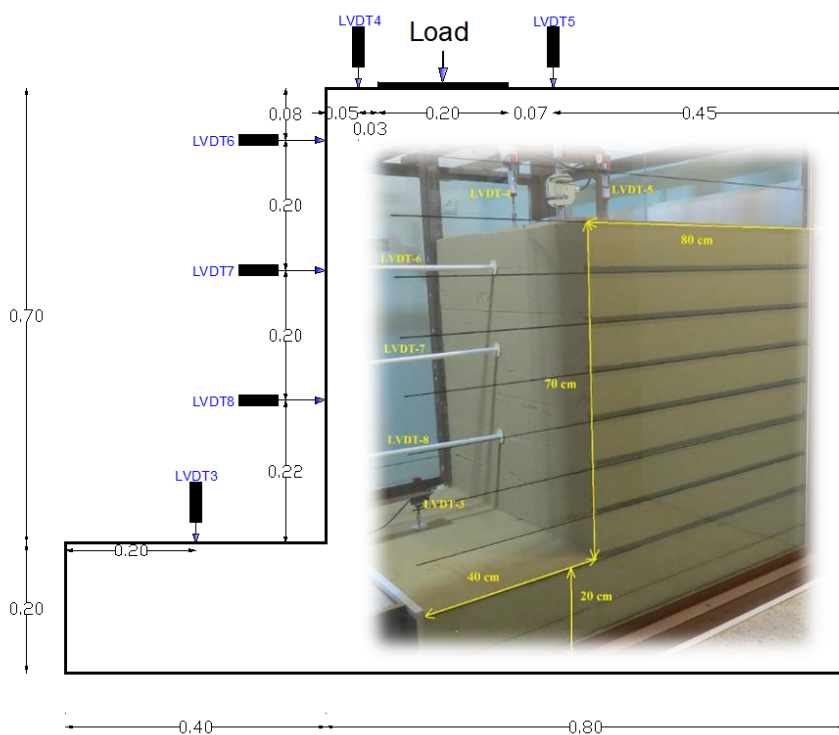
لازم به توضیح است که در مراحل گودبرداری مرحله‌ای، سرباری به مدل اعمال نگردید؛ علت این امر، بررسی اثر گودبرداری مرحله‌ای و تأثیر سربار بصورت جداگانه در تغییرشکل‌های هر یک از مدل‌ها می‌باشد. پس از برداشتن آخرین قالب (آخرین لایه)، عملیات بارگذاری مدل از طریق یک سربار با ابعاد 20×30 سانتیمتر که ابعاد آن برای کل مدل‌ها ثابت می‌باشد، در موقعیت نشان داده شده در شکل ۴ انجام گردید. بدیهی‌ست علت انتخاب سربار با ابعاد ثابت برای کل مدل‌ها، فراهم نمودن امکان مقایسه نتایج می‌باشد. عملیات بارگذاری نیز با اعمال بار افزایشی با گام‌های ۱۰ کیلوگرم در هر مرحله از بارگذاری انجام گردید و سعی گردید سرعت بارگذاری در کلیه مراحل و کلیه مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شود.

مقادیر تغییرشکل‌های قائم سطح مجاور گود و همچنین تغییرشکل‌های افقی دیواره‌ی گود و تورم کف گود از طریق ابزارهای اندازه‌گیری تغییرشکل (LVDT) در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل ۳ و ۴ اندازه‌گیری و توسط دیتالاگر ثبت گردید.

در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در این پژوهش سعی گردید با اعمال دقت کافی در عملیات اجرایی و کالیبره‌ی کلیه‌ی ابزار ثبت و اندازه‌گیری داده‌ها، نتایج از صحت، دقت و تکرارپذیری قابل قبولی برخوردار باشند. تکرارپذیری آزمایشات با حصول نتایج مشابه کمی و کیفی از طریق تکرار آزمایشات یکسان، تأیید و اثبات گردید. علاوه بر این، همانطور که در ادامه و در بخش ارائه نتایج مشاهده می‌شود، مقادیر به‌دست آمده از مدل‌های ایجاد شده با طول‌های مختلف از هم‌خوانی مناسبی نیز با یکدیگر برخوردار بوده و روند منطقی و مشابهی را دنبال کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که تفاوت‌های موجود را می‌توان با استفاده از اصول و منطق حاکم بر مسأله توجیه نمود که این مسأله نیز می‌تواند تأییدی بر صحت آزمایشات باشد.

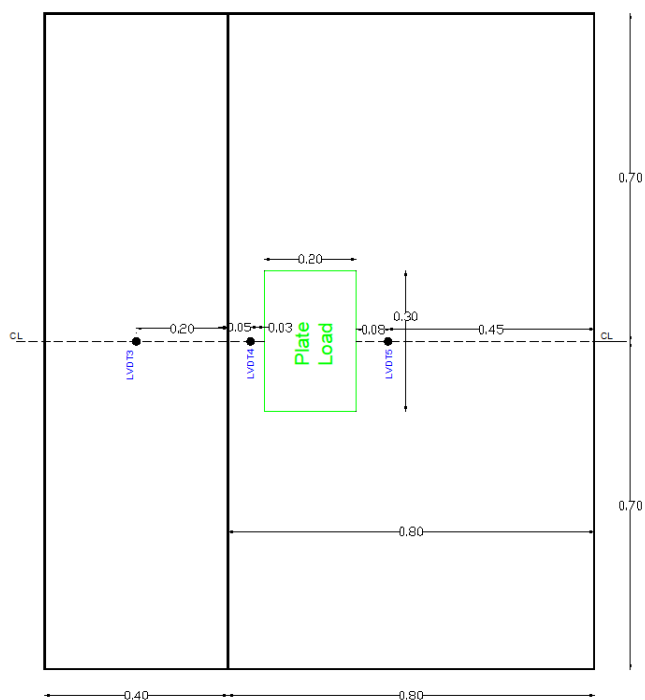


شکل ۲: نمودار دانه‌بندی مصالح مورد استفاده جهت مدل‌سازی (ماسه ۱۶۱ فیروزکوه).

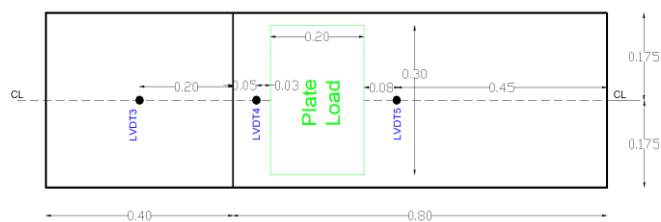


شکل ۳: مقطع عرضی مدل‌های ساخته شده (ابعاد بر حسب متر).

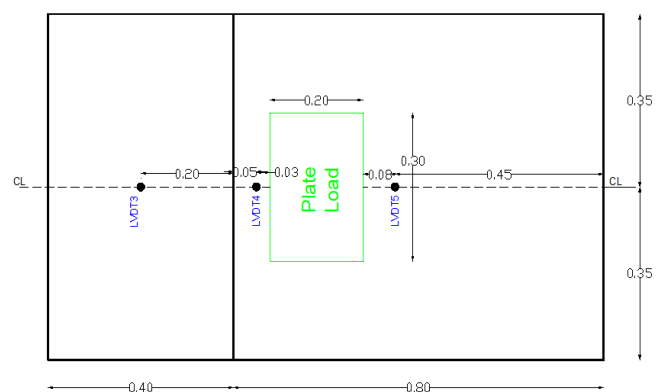
ج) مدل ۱۴۰ سانتیمتری (L-140)



الف) مدل ۳۵ سانتیمتری (L-35)



ب) مدل ۷۰ سانتیمتری (L-70)



شکل ۴: پلان مدل‌های ایجاد شده (ابعاد بر حسب متر).



الف) قبل از لایه‌برداری



ب) بعد از برداشت لایه دوم



ج) بعد از برداشت لایه پنجم



د) بعد از برداشت لایه آخر (مدل نهائی)

شکل ۵: مراحل مختلف باز کردن قالب‌ها برای مدل‌سازی گودبرداری مرحله‌ای (مدل با طول ۳۵ سانتیمتر).



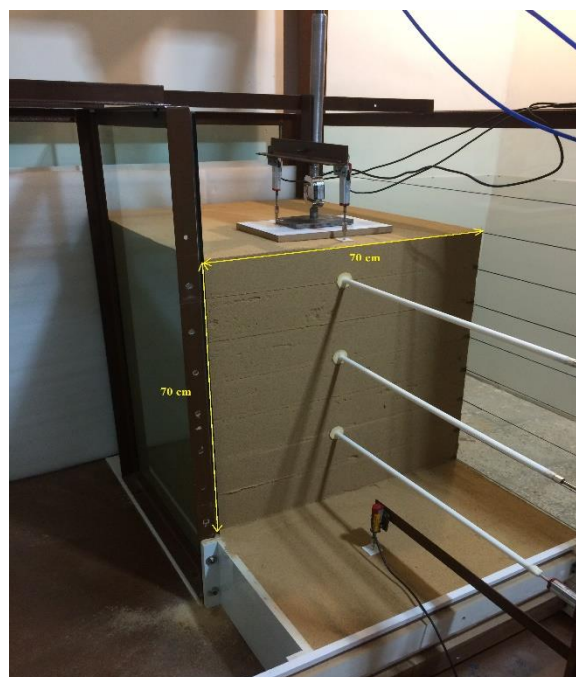
الف) قبل از لایه برداری



ب) بعد از برداشت لایه دوم



ج) بعد از برداشت لایه چهارم



د) بعد از برداشت لایه آخر (مدل نهایی)

شکل ۶: مراحل مختلف باز کردن قالبها برای مدل سازی گودبرداری مرحله ای (مدل با طول ۷۰ سانتیمتر).



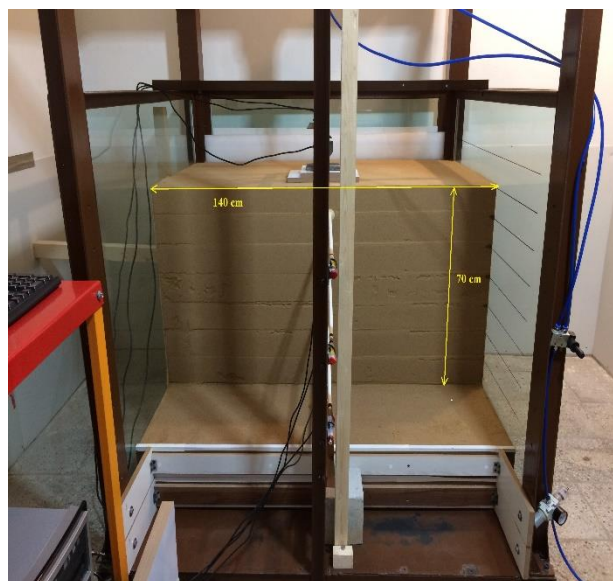
الف) قبل از لایه برداری



ب) بعد از برداشت لایه دوم



ج) بعد از برداشت لایه چهارم



د) بعد از برداشت لایه آخر (مدل نهایی)

شکل ۷: جعبه و قاب مدل فیزیکی و مراحل مختلف گودبرداری مرحله‌ای (مدل با طول ۱۴۰ سانتیمتر).

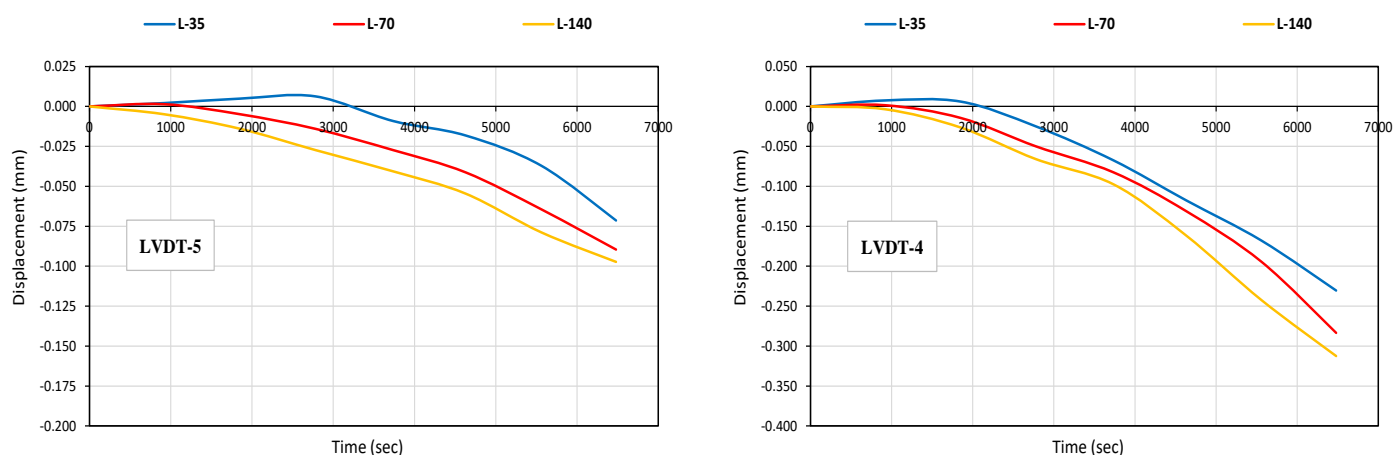
۵- ارائه نتایج

به‌منظور بررسی نتایج بدست آمده از آزمایشات مدل‌ها، این نتایج در دو بخش جداگانه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. بخش اول؛ حین گودبرداری مرحله‌ای (ایجاد ترانشه) و بخش دوم؛ هنگام اعمال بار افزایشی. تغییرشکل‌های مورد بررسی در هر بخش نیز شامل تغییرشکل‌های قائم (نشست) مجاور گود، تغییرشکل‌های افقی (انحراف) دیواره‌ی گود و تغییرشکل‌های قائم (تورم) کف گود می‌باشد.

۵-۱- نتایج تغییرشکل‌ها حین ساخت (گودبرداری مرحله‌ای)

همانطور که بیان گردید، اساساً تغییرشکل‌های یک گود از سه منظر نشست‌های سطحی، انحراف دیواره و تورم کف گود قابل بررسی و حائز اهمیت می‌باشد که در این بخش به بررسی و مقایسه این مقادیر در مدل‌ها با طول‌های مختلف حین گودبردای پرداخته شده است. لازم به توضیح است به‌منظور فراهم شدن امکان مقایسه نتایج، سعی گردیده است که برداشت قالب‌های نگهدارنده برای کل مدل‌ها در فواصل زمانی یکسان (حدود ۱۵ دقیقه برای هر لایه) صورت گیرد.

نمودارهای شکل ۸ بیانگر تغییرات نشست‌های سطحی مجاور گود بر حسب زمان گودبرداری در ابزار اندازه‌گیری تغییرشکل قائم شماره ۴ و ۵ (LVDT-4 و LVDT-5) در مدل‌های ۳۵، ۷۰ و ۱۴۰ سانتیمتری می‌باشد. یادآور می‌شود که LVDT-4 در فاصله ۵ سانتیمتری و LVDT-5 در فاصله ۳۵ سانتیمتری از لبه گود قرار گرفته است (شکل ۴).

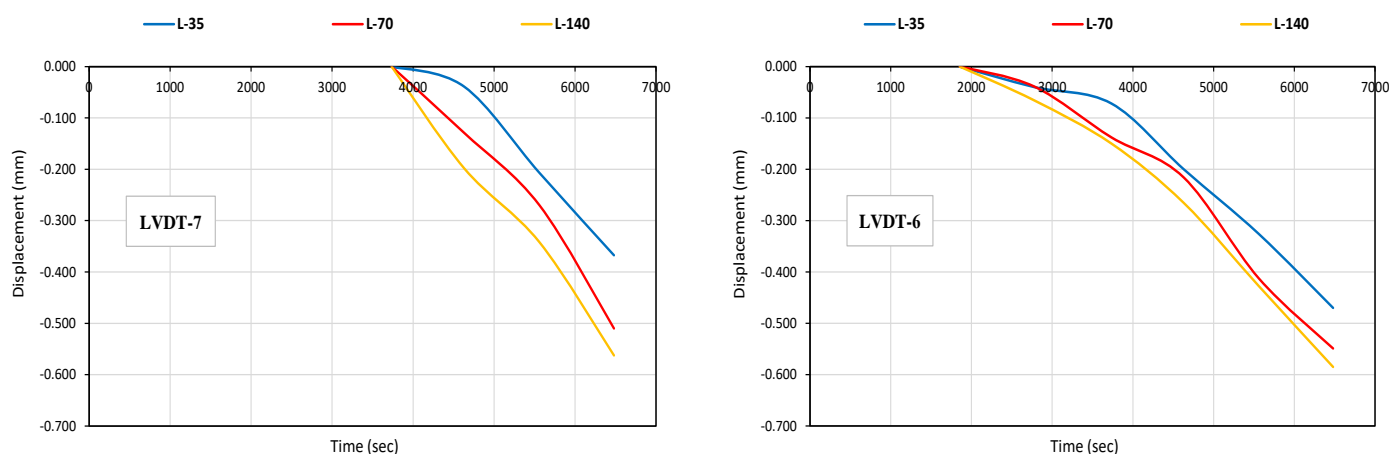


شکل ۸: تغییرات نشست‌های سطحی مجاور گود بر حسب زمان در هر سه مدل حین ساخت.

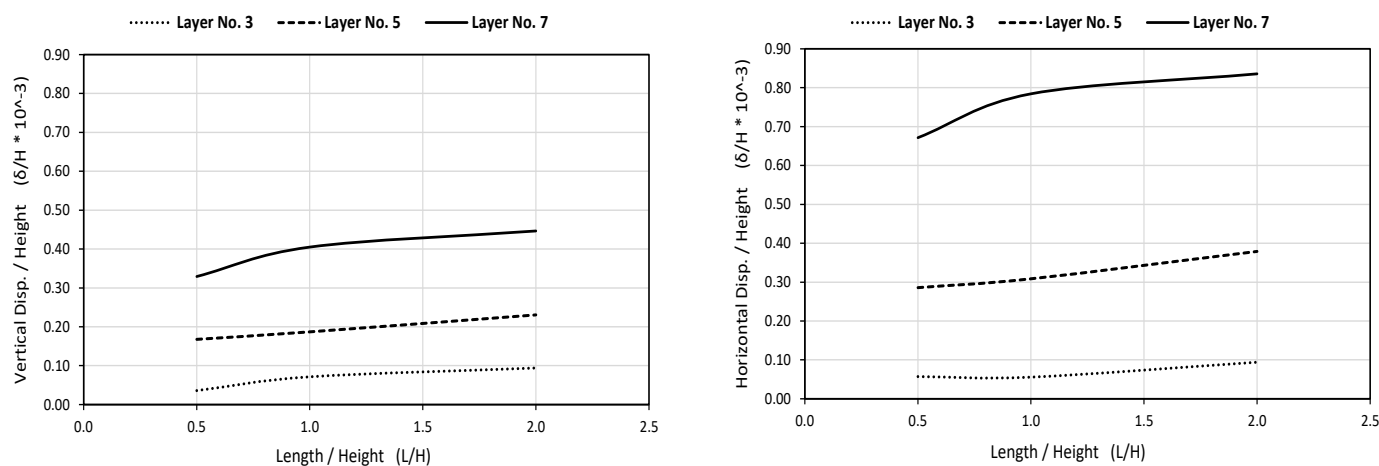
همانطور که در نمودارهای شکل ۸ مشاهده می‌گردد، مقادیر تغییرشکل‌های حین ساخت با افزایش بعد سوم مدل افزایش داشته است؛ اما همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقدار این تفاوت‌ها نسبت به ابعاد مدل‌ها بسیار کم و جزئی می‌باشد. علاوه بر این، در مراحل اولیه گودبرداری، مقداری تورم در مدل ۳۵ سانتیمتری و مقداری کمتری نیز در مدل ۷۰ سانتیمتری مشاهده گردیده است اما این تورم در مدل ۱۴۰ سانتیمتری دیده نشده است.

روند مذکور در نمودارهای شکل ۹ که انحراف دیواره گود را بر حسب زمان گودبرداری در ابزارهای شماره ۶ و ۷ (LVDT-6) و LVDT-7) نشان می‌دهند نیز مشاهده گردیده است. لازم به ذکر است LVDT-6 در ارتفاع (۸-) سانتیمتری از لبه گود و پس از برداشت لایه دوم نصب گردیده و LVDT-7 نیز در ارتفاع (۲۸-) سانتیمتری از لبه گود و پس از برداشت لایه چهارم نصب و قرائت گردیده است. بدیهی‌ست علت عدم ثبت قرائت در مراحل اولیه این ابزارها تأخیر نصب با توجه به موقعیت ابزار مربوطه می‌باشد.

به منظور فهم بهتر تأثیر بعدسوم (طول مدل) در مقادیر تغییرشکل‌ها، پارامتر بی بعدی بصورت L/H (که در آن L طول مدل و H ارتفاع نهائی گود می‌باشد) تعریف گردید و مقادیر تغییرشکل‌های ثبت شده توسط ابزارها در سه مقطع زمانی؛ برداشت لایه سوم، لایه پنجم و لایه هفتم (آخرین لایه)، با این پارامتر ترسیم گردید (شکل ۱۰). برای بررسی تغییرشکل‌های افقی دیواره، از LVDT-6 و به منظور مقایسه نشست‌های مجاور، از LVDT-4 استفاده گردیده است و کلیه مقادیر تغییرشکل‌ها نیز از طریق تقسیم آنها به ارتفاع نهائی گود، بی بعد شدند. با مقایسه این نمودارها همانطور که اشاره گردید، اندکی افزایش در مقادیر تغییرشکل‌های افقی و قائم با افزایش بعد سوم مدل وجود دارد اما مقدار این افزایش نسبت به ابعاد مدل‌ها همانگونه که ملاحظه می‌شود، بسیار کم می‌باشد و مقدار این تفاوت نیز با افزایش ارتفاع آزاد گود (پیشرفت گودبرداری) افزایش داشته است.



شکل ۹: تغییرات انحراف دیواره گود بر حسب زمان در هر سه مدل حین ساخت.

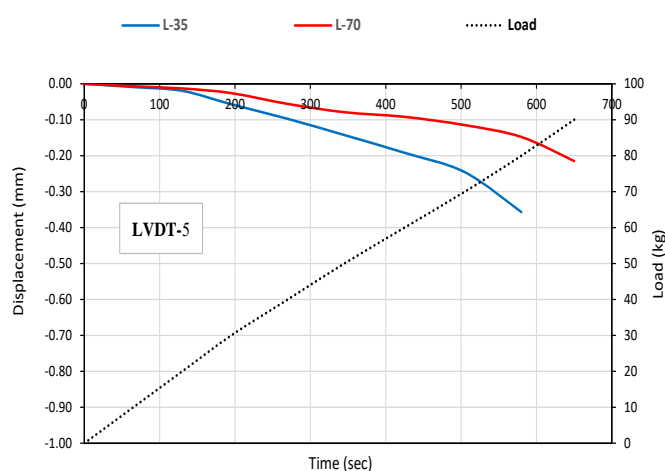


شکل ۱۰: تغییرات تغییرشکل‌های افقی و قائم نرمالایز شده با نسبت (L/H) حین ساخت.

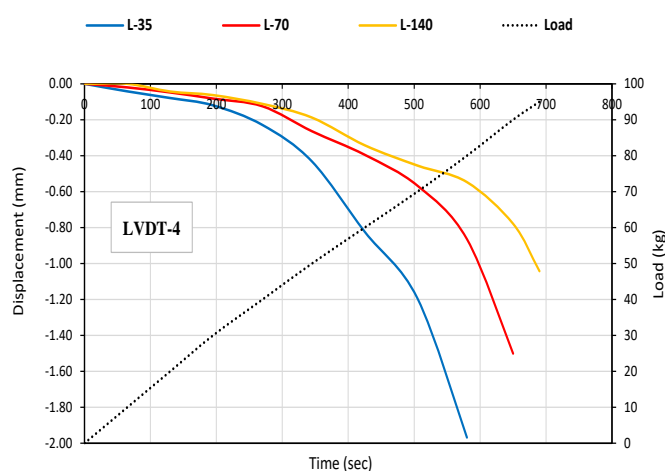
۵-۲- نتایج تغییر شکل مدلها حین بارگذاری

برای بررسی و مقایسه نشست‌های سطحی و انحراف دیواره گود در مدل‌های سه‌گانه، روندی مشابه قبل در پیش گرفته شد؛ با این تفاوت که در این مرحله، دو ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل با نامهای LVDT-3 و LVDT-8 که در زمان ساخت، به دلیل زمان و محل نصبشان، امکان ثبت پارامتری را نداشتند، به مدل‌ها و نتایج ثبت شده اضافه گردید. LVDT-8 در ارتفاع (۴۸-) سانتیمتری از لبه گود و پس از برداشت لایه ششم نصب گردید و LVDT-3 نیز به منظور بررسی تورم کف گود در فاصله ۲۰ سانتیمتری از دیواره گود و در کف گود نصب گردید. سرعت بارگذاری نیز برای کل مدل‌ها بصورت یکسان و حدود ۱۰ کیلوگرم در هر ۷۵ ثانیه در نظر گرفته شد.

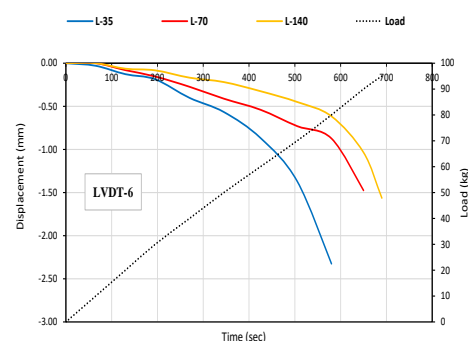
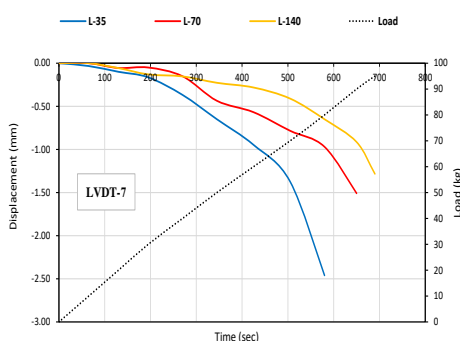
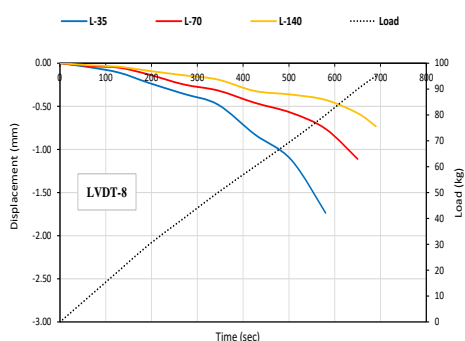
نمودارهای شکل ۱۱ بیانگر تغییرات نشست‌های سطحی بر حسب بار وارده در ابزارهای شماره ۴ و ۵ در مدل‌های سه‌گانه می‌باشد و نمودارهای شکل ۱۲ نیز نمایشگر تغییرات انحراف دیواره گود حین بارگذاری افزایشی می‌باشند.



شکل ۱۱: تغییرات نشست‌های سطحی مجاور گود بر حسب زمان در هر سه مدل حین بارگذاری.



شکل ۱۲: تغییرات انحراف دیواره گود بر حسب زمان در هر سه مدل حین بارگذاری.



شکل ۱۳: تغییرات انحراف دیواره گود بر حسب زمان در هر سه مدل حین بارگذاری.

نمودارهای شکل ۱۱ و ۱۲ حاکی از آن است که مقادیر تغییر شکل‌های ثبت شده در مدل‌ها حین بارگذاری، با افزایش بعد سوم مدل بر خلاف آنچه که در نمودارهای حین ساخت مشاهده گردید، کاهش داشته است و مقدار این کاهش نیز قابل توجه می‌باشد. لازم به

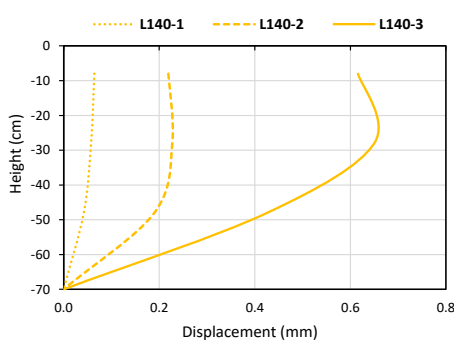
ذکر است، در کلیه ابزارها با نزدیک شدن به بار بحرانی، نرخ افزایش تغییرشکل‌ها افزایش داشته تا در نهایت به گسیختگی منجر گردیده است. همچنین ملاحظه گردید که مقادیر تغییرشکل‌های افقی در ترازهای فوقانی (ابزارهای شماره ۶ و ۷)، بسیار به هم نزدیک می‌باشند.

بار گسیختگی و تنش متناظر آن نیز برای هر یک از مدل‌ها، در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج بدست آمده حکایت از آن دارد که با افزایش بعد مدل، مقدار بار و تنش متناظر گسیختگی، افزایش داشته است اما مقدار این افزایش در مدل ۷۰ سانتیمتری نسبت به مدل ۳۵ سانتیمتری در مقایسه با افزایش بار گسیختگی در مدل ۱۴۰ سانتیمتری نسبت به مدل ۷۰ سانتیمتری بسیار بیشتر بوده است (۱۱٫۹ درصد در مقابل ۵٫۳ درصد).

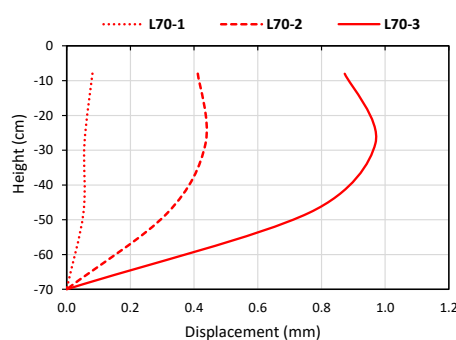
جدول ۲: بار و تنش گسیختگی در هر یک از مدل‌ها.

نام مدل	بار گسیختگی (kg)	تنش گسیختگی (kg/cm ²)	درصد افزایش
مدل ۳۵ سانتیمتری	80.4	0.134	-
مدل ۷۰ سانتیمتری	90.2	0.150	11.9
مدل ۱۴۰ سانتیمتری	94.7	0.158	5.3

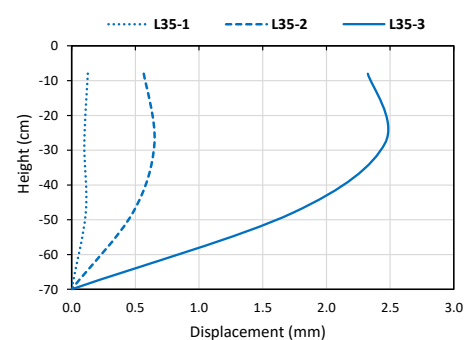
در نمودارهای شکل ۱۳ نیز سعی گردیده که با وجود سه ابزار اندازه‌گیری تغییرشکل افقی در دیواره گود، پروفیل تغییرشکل دیواره گود در مراحل مختلف بارگذاری (مرحله اول؛ بار ۲۰ کیلوگرم، مرحله دوم؛ بار ۵۰ کیلوگرم و مرحله سوم؛ بار ۸۰ کیلوگرم) برای هر یک از مدل‌های مذکور ترسیم گردد. همانطور که از این نمودارها ملاحظه می‌شود، در مراحل اولیه بارگذاری، تغییرشکل افقی دیواره گود در بخش‌های فوقانی در مقایسه با بخش‌های تحتانی، بیشتر بوده ولی با پیشرفت بارگذاری و افزایش سطح تنش، این نمودارها به حالت مقعر^۲ (کاسه‌ای) درآمدند؛ به گونه‌ای که تغییرشکل حداکثر در ارتفاع تقریبی ۲۰ الی ۳۰ سانتیمتری از تاج گود اتفاق افتاده است. همچنین با ترسیم این مقادیر برای هر سه مدل در یک نمودار در مراحل میانی بارگذاری (بار ۵۰ کیلوگرم) در نمودار شکل ۱۴، می‌توان دید که نقطه وقوع حداکثر تغییرشکل در هر سه مدل در ارتفاع یکسان و حدود ۲۶ سانتیمتر از تاج قرار گرفته است. همچنین در این مرحله از بارگذاری، مشاهده شد که مدل‌های کوچکتر میزان تقعر بیشتری نسبت به مدل‌های طولتر دارا می‌باشند.



(مدل ۱۴۰ سانتیمتری)



(مدل ۷۰ سانتیمتری)

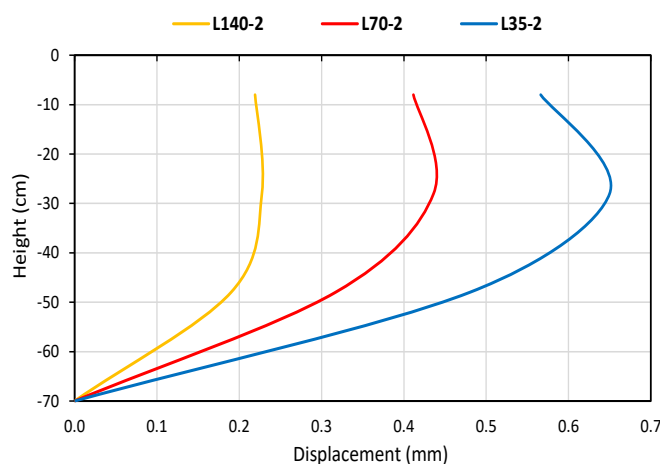


(مدل ۳۵ سانتیمتری)

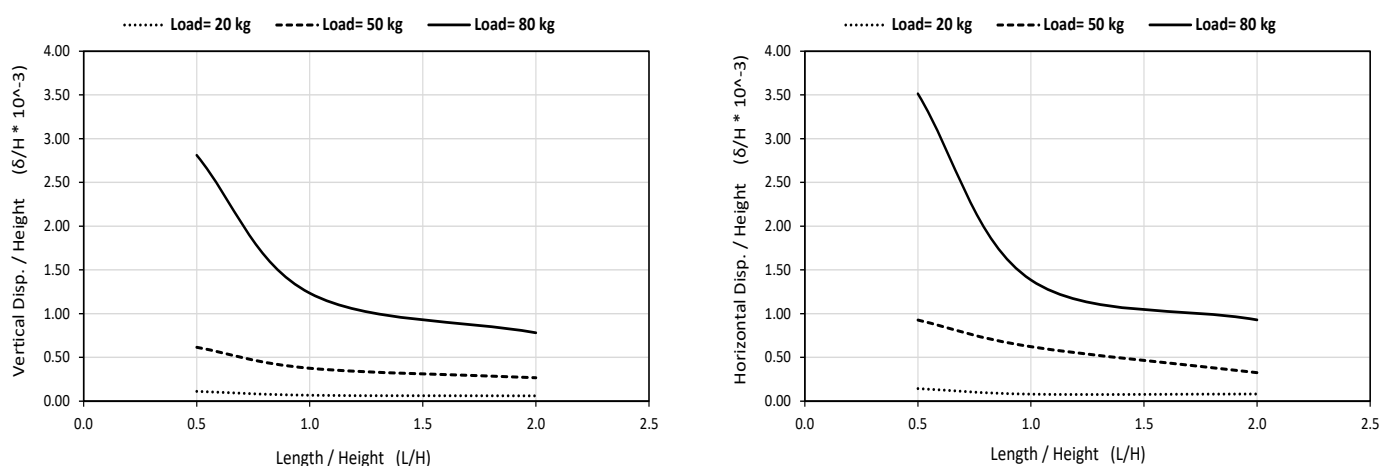
شکل ۱۳: پروفیل تغییرشکل دیواره گود در هر سه مدل حین مراحل مختلف بارگذاری (L-1: بار ۱۰ کیلوگرم، L-2: بار ۵۰ کیلوگرم، L-3: بار ۸۰ کیلوگرم).

به‌منظور مقایسه تأثیر بعد سوم مدل‌ها در مقادیر تغییرشکل‌ها، پارامتر بی بعد L/H مشابه بخش ۱-۴ تعریف گردید و مقادیر تغییرشکل‌های ثبت شده توسط ابزارها در سه مرحله از بارگذاری (مرحله اول؛ بار ۲۰ کیلوگرم، مرحله دوم؛ بار ۵۰ کیلوگرم و مرحله سوم؛ بار ۸۰ کیلوگرم) ترسیم گردید (شکل ۱۵). برای بررسی تغییرشکل افقی، از LVDT-7 و به‌منظور بررسی تغییرشکل قائم، از LVDT-4 استفاده گردید. با مقایسه این نمودارها ملاحظه می‌شود که اختلاف بین مقادیر تغییرشکل‌ها در مدل‌های سه‌گانه، با افزایش سطح تنش و نزدیک شدن به وقوع گسیختگی، افزایش بیشتری داشته است. همچنین نکته مهم دیگری که می‌توان از این نمودارها استخراج کرد، این است که با افزایش نسبت (L/H) که به معنای افزایش طول مدل‌ها می‌باشد، اختلاف مقادیر ثبت شده، کمتر شده است؛ به گونه ای که به نظر می‌رسد، این نمودارها تمایل به همگرا شدن در یک نقطه واحد را خواهند داشت.

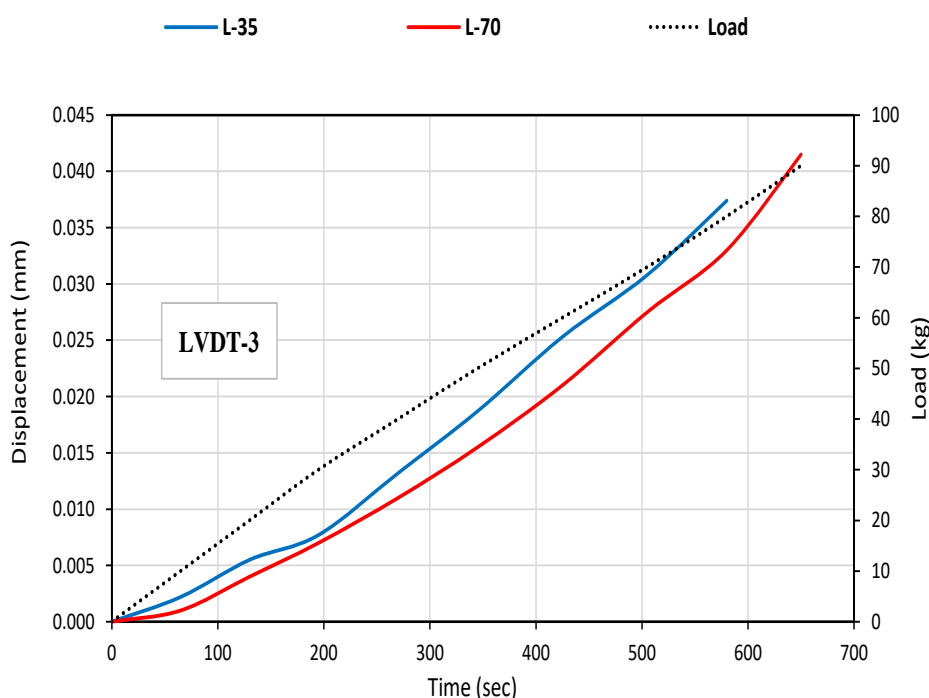
مقادیر ثبت شده توسط LVDT-3 که معرف تورم کف گود حین بارگذاری می‌باشد، در شکل ۱۶ ارائه شده است. از نتایج ثبت شده اینگونه بر می‌آید که مقدار تورم کف گود در زمان بارگذاری نسبت به تغییرشکل‌های افقی و قائم، بسیار اندک و قابل صرف‌نظر می‌باشد. در این نمودار نیز همانطور که ملاحظه می‌شود، مقادیر ثبت شده در مدل ۳۵ سانتیمتری نسبت به مدل ۷۰ سانتیمتری اندکی بیشتر است. لازم به ذکر است که این LVDT در مدل ۱۴۰ سانتیمتری دچار نقص گردیده و قرائت نشده است.



شکل ۱۴: پروفیل تغییرشکل دیواره گود در هر سه مدل در مرحله دوم بارگذاری.



شکل ۱۵: تغییرات تغییرشکل‌های افقی و قائم نرمالایز شده با نسبت (L/H) حین بارگذاری.



شکل ۱۶: مقادیر تورم کف گود در مدل های ۳۵ و ۷۰ سانتیمتری.

۶- تفسیر نتایج

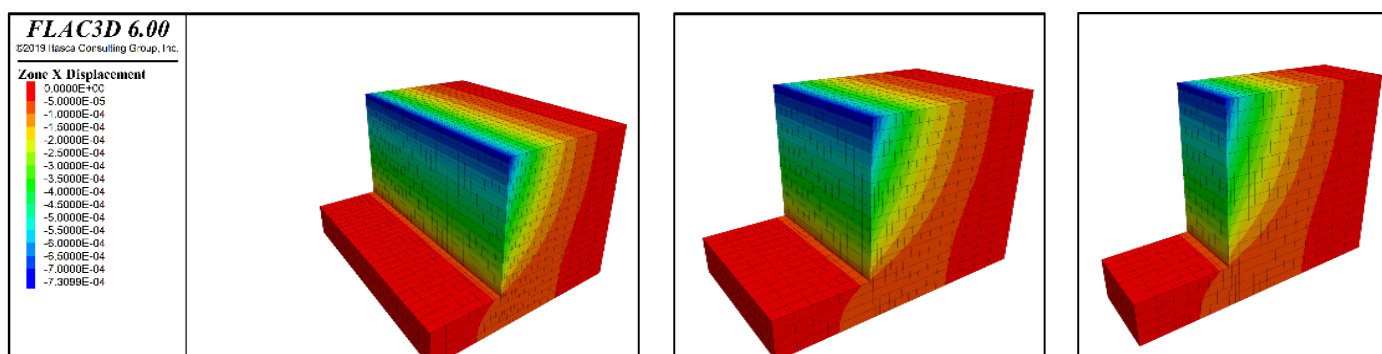
همانگونه که ملاحظه گردید، تغییرشکل های افقی و قائم ثبت شده توسط ابزارهای اندازه گیری، حین مراحل ساخت ترانشه (گودبرداری)، در مدل های با طول (بعد سوم) بیشتر، نسبت به مدل های با طول کمتر، اندکی افزایش را نشان داد. با توجه به اینکه در مدل های ایجاد شده در این پژوهش، هیچگونه تغییری در هندسه (مقطع عرضی) گود در طول وجود ندارد و شرایط بارگذاری در زمان ساخت و همچنین مشخصات مصالح کاملاً یکسان می باشد و به بیانی شرایط موجود کاملاً با شرایط کرنش مسطح انطباق دارد، انتظار می رفت مقادیر ثبت شده در ابزارهای متناظر در همه مدل ها نیز یکسان باشد اما در عمل تفاوت هر چند اندکی مشاهده گردید. به منظور بررسی بیشتر این پدیده، مدل های عددی سه بعدی مختلفی با مقاطع عرضی یکسان ولی طول های متفاوت برای مدل سازی ساخت مرحله ای (بدون سربار)، ایجاد گردید. جالب است که پس از تحلیل مدل ها، هیچگونه اختلافی حتی به میزان خیلی کم بین مدل های عددی با طول های مختلف، مشاهده نگردید که البته به لحاظ عددی هم دلیلی برای وجود اختلاف بین نتایج، وجود ندارد. نگارنده معتقد است که تنها عامل بروز اختلاف بین نتایج، اثر بعد سوم مدل می باشد. در واقع می توان اینگونه عنوان نمود که حتی در صورت یکسان بودن کلیه پارامترها و احراز کامل شرایط کرنش مسطح، با افزایش بعد سوم و بزرگتر شدن هندسه در راستای این بعد، همواره تغییرشکل ها هر چند به میزان کم افزایش خواهند داشت و این پدیده توسط مدل های عددی، قابل بیان نمی باشد.

نمونه ای از خروجی این مدل های عددی که با نرم افزار FLAC3D v6.0 و با استفاده از مدل رفتاری خاک سخت شونده (HS)^{۲۲} ایجاد گردیده است، در شکل ۱۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می گردد، در هر سه مدل عددی با طول های مختلف پس از انجام آنالیز برگشتی^{۲۳} و انطباق قابل قبول نتایج با مدل های فیزیکی، مقادیر تغییرشکل های افقی بدست آمده در زمان ساخت (پایان گودبرداری)، کاملاً با هم برابر می باشند که خلاف آن در مدل های آزمایشگاهی مشاهده گردید. بدیهی است نتایج مشابهی برای تغییرشکل های قائم و سایر پارامترها نیز بدست آمد که به منظور رعایت اختصار، از ارائه آنها صرف نظر گردید.

² Hardening Soil 2
² Back Analyse 3

در مرحله بارگذاری، وجود بار با هندسه مشخص، باعث گردیده که شرایط مسأله، تغییر یافته و تفاوت‌ها آشکار گردد. همانگونه که بیان شد، برخلاف شرایط حین ساخت، در مرحله بارگذاری، تغییرشکل مدل‌های طولتر نسبت به مدل‌های با طول کمتر به مقدار قابل-توجهی کمتر بوده است. دلیل این امر را با توجه به شکل‌گیری صفحات گسیختگی در مدل‌ها (شکل ۱۸) می‌توان اینگونه عنوان نمود که در مدل ۳۵ سانتیمتری همانطور که در شکل ۱۸-الف مشاهده می‌گردد، صفحات گسیختگی توسط مرزهای شیشه‌ای فاقد اصطکاک جعبه مدل‌سازی، قطع شده اند. به بیان ساده‌تر مساحت سطح گسیختگی که تأمین کننده نیروی مقاوم در برابر گسیختگی برشی خاک می‌باشد، در این مدل کمترین مقدار را داراست؛ بنابراین در بار کمتری گسیخته شده است (جدول ۲) و طبیعتاً مقدار تغییرشکل‌های آن نیز در مقایسه با سایر مدل‌ها بیشتر است. در واقع با توجه به طول صفحه بارگذاری (۳۰ سانتیمتر) و بعد سوم این مدل (۳۵ سانتیمتر)، می‌توان گفت که این مدل حتی با وجود صفحه بارگذاری، در شرایط نزدیک به حالت کرنش مسطح می‌باشد.

در مدل ۷۰ سانتیمتری، بخش بسیار کمی از سطح گسیختگی توسط مرزهای فاقد اصطکاک قطع شده و صفحه گسیختگی، توسعه بیشتری نسبت به مدل ۳۵ سانتیمتری داشته است. در واقع وجود بار، باعث شده که شرایط مسأله از حالت کرنش مسطح خارج شود و با توجه به افزایش قابل توجه مساحت صفحه گسیختگی، مقادیر تغییرشکل‌ها به مراتب کمتر و طبیعتاً بار گسیختگی نیز بیشتر شده است. این افزایش در خصوص مدل ۱۴۰ سانتیمتری که امکان شکل‌گیری کامل صفحه گسیختگی را مطابق شکل ۱۸-ج داشته است، نیز مشاهده گردیده است اما با توجه به اختلاف کم بین مساحت سطح گسیختگی نسبت به مدل ۷۰ سانتیمتری، نرخ افزایش بار گسیختگی و همینطور نرخ کاهش تغییرشکل‌ها در این مدل کمتر بوده است. مطابق جدول ۲ میزان افزایش بار گسیختگی در مدل L-140 نسبت به مدل L-70، ۵،۳ درصد بوده حال آنکه میزان این افزایش در مدل L-70 نسبت به مدل L-35، ۱۱،۹ درصد بوده است. نرخ کاهش تغییرشکل‌ها با افزایش نسبت طول به ارتفاع گود در شکل ۱۵ نیز مؤید این واقعیت می‌باشد.

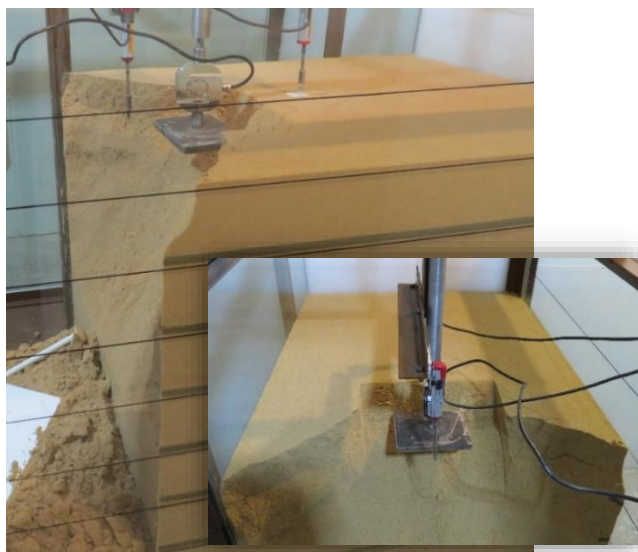


ج) مدل ۱۴۰ سانتی‌متری

ب) مدل ۷۰ سانتی‌متری

الف) مدل ۳۵ سانتی‌متری

شکل ۱۷: تشابه کیفی و کمی کانتورهای تغییرشکل افقی هر سه مدل عددی با طول‌های مختلف در پایان گودبرداری.



ب) مدل ۷۰ سانتیمتری



الف) مدل ۳۵ سانتیمتری

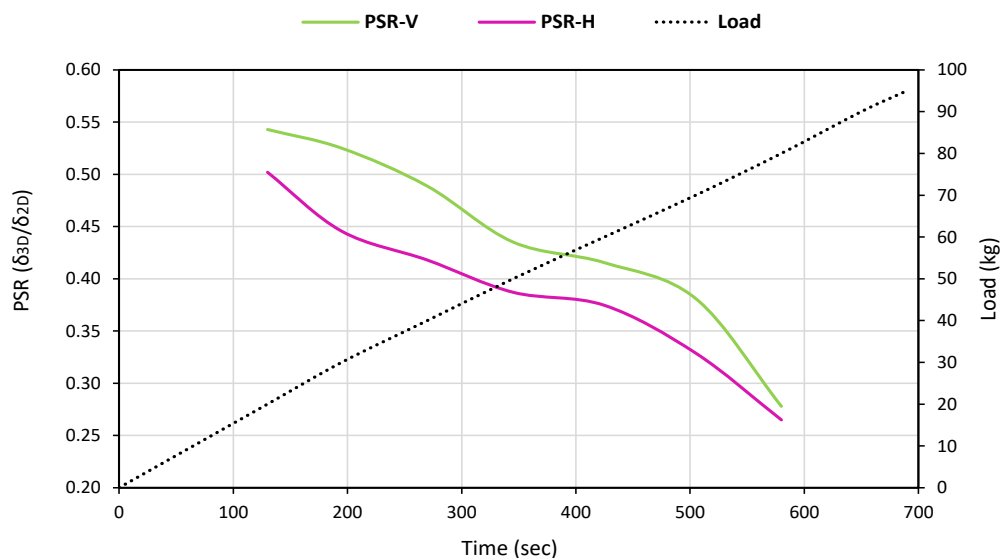


ج) مدل ۱۴۰ سانتیمتری

شکل ۱۸: تصاویر سطوح گسیختگی شکل گرفته در مدل‌ها.

همانگونه که گفته شد، مدل ۳۵ سانتیمتری با توجه به طول صفحه بارگذاری (۳۰ سانتیمتر) در شرایط نزدیک به حالت کرنش مسطح بوده و می‌توان آن را تقریبی از یک مدل دوبعدی دانست. از طرفی نتایج مدل ۱۴۰ سانتیمتری نیز انطباق کامل با یک مدل سه-بعدی دارد. بنابراین با استفاده از نتایج بدست آمده برای این مدل‌ها می‌توان نسبت PSR (معادله ۱) را برای هر یک از ابزارهای اندازه‌گیری محاسبه نمود. این نسبت برای LVDT-4 (نشست مجاور گود) و LVDT-5 (انحراف تاج گود) در نمودار شکل ۱۹ ترسیم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، عدد PSR از ۰٫۲۶۵ الی ۰٫۵۴۳ متغیر می‌باشد و این پارامتر با افزایش سطح تنش و نزدیک شدن به مرز گسیختگی، خاک کاهش می‌یابد که با توجه به توسعه صفحات گسیختگی با افزایش تنش، امری منطقی می‌باشد. بنابراین نتیجه می‌شود که عدد PSR برای یک گود علاوه بر تأثیرپذیری از هندسه و ابعاد گود (مطابق شکل ۱)، از میزان سربار اعمال شده نیز متأثر می‌شود؛ به نحوی که با افزایش بار وارده و نزدیک شدن به گسیختگی، میزان آن کاهش می‌یابد. علاوه بر این از نمودار شکل ۱۹ می‌توان

نتیجه گرفت که تفاوت مدل سه‌بعدی با مدل دوبعدی در مقادیر انحراف دیواره گود نسبت به مقادیر نشست‌های مجاور، بیشتر خود را نشان می‌دهد چراکه عدد PSR-H (برای تغییرشکل‌های افقی)، نسبت به PSR-V (برای تغییرشکل‌های قائم) مقادیر کمتری را دارا می‌باشد.



شکل ۱۹: تغییرات نسبت PSR برای تغییرشکل‌های افقی و قائم گود حین بارگذاری.

۷- نتیجه‌گیری

رعایت صرفه اقتصادی در کنار تأمین ایمنی در ساخت و سازه‌های عمرانی، خصوصاً عملیات گودبرداری، ارزش علم مهندسی ژئوتکنیک را آشکار می‌نماید. در واقع یک طراحی مهندسی برای یک سازه ژئوتکنیکی زمانی ارزشمند است که این دو مقوله یعنی ایمنی و اقتصاد را بطور همزمان در بر گیرد. با توجه به اهمیت بخش گودبرداری در ساخت و سازه‌های امروزه و ابهامات موجود در این راستا، در تحقیق حاضر سعی گردید تا با استفاده از روش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس که بواسطه ماهیت آن، روشی مورد اطمینان در پژوهش‌های نوین ژئوتکنیک قلمداد می‌گردد، به بررسی این موضوع پرداخته شود. هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر بعد سوم مدل (بعد عمود بر صفحه) در پاسخ یک گود مهار نشده می‌باشد. اثر این پارامتر در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت؛ حالت اول حین عملیات گودبرداری و بدون وجود سربار و حالت دوم هنگام اعمال بار بصورت افزایشی تا گسیختگی مدل. نتایج بدست آمده از این تحقیق در موارد ذیل خلاصه می‌گردد. لازم به توضیح است که با توجه به عدم قطعیت‌های موجود و آزمایشات محدود انجام شده، نتایج ارائه شده، قابل بسط و تعمیم به مدل‌های واقعی نمی‌باشند.

۱- با افزایش بعد سوم مدل، حتی با وجود ثابت بودن کلیه پارامترها از قبیل هندسه، شرایط بارگذاری و مشخصات مصالح و به بیانی احراز شرایط کرنش مسطح، شاهد افزایش مقادیر تغییرشکل‌ها هر چند به میزان کم خواهیم بود. این افزایش، توسط مدل‌های عددی قوی نظیر مور-کولمب و خاک سخت شونده، قابل بیان نمی‌باشد و این مدل‌ها در این شرایط نتایج کاملاً یکسانی را خواهند داشت. همانطور که در بخش‌های قبل نیز اشاره گردید، مدل‌های فیزیکی با ملحوظ نمودن کلیه بخش‌های تأثیرگذار در سازه‌های ژئوتکنیکی و فراهم کردن امکان مشاهده کیفی پدیده‌ها، شکل‌گیری مکانیزم‌ها و پاسخ کلی سازه، توانائی بیشتری را به محقق می‌دهد و از این نظر به مدل‌های عددی ارجحیت دارند. لذا نگارنده معتقد است حتی با وجود مشکلات ساخت مدل‌های فیزیکی و زمان‌بر بودن و پرهزینه بودن آنها، در بررسی و شناخت پدیده‌ها و سازه‌های ژئوتکنیکی حساس حتی در بررسی‌های پارامتری، این روش پژوهش بر سایر روشهای متداول ارجحیت دارد.

۲- با افزایش طول مدل و به دلیل امکان شکل‌گیری کاملتر صفحات گسیختگی، میزان تغییرشکل‌های افقی و قائم مدل کاهش قابل توجهی یافته و به پیروی از آن، بار گسیختگی نیز در مدل‌های بررسی شده افزایش داشته است. در واقع می‌توان گفت که فراهم بودن امکان توسعه و شکل‌گیری کامل صفحات گسیختگی، عامل بسیار مهمی در پاسخ کلی گود خصوصاً ضریب اطمینان گود در مقابل گسیختگی می‌باشد که این عامل نیز کاملاً متأثر از بعد سوم مدل می‌باشد.

۳- میزان اختلاف بین تغییرشکل‌ها و بار گسیختگی، بین مدل‌های ۳۵ و ۷۰ سانتیمتری به مراتب از اختلاف این مقادیر در مدل‌های ۷۰ و ۱۴۰ سانتیمتری بیشتر است؛ به کلام دیگر، با افزایش نسبت طول مدل به ارتفاع آن، مقادیر تغییرشکل‌های ثبت شده و بار گسیختگی مدل‌ها تمایل به همگرا شدن دارند. همانطور که اشاره گردید، این موضوع به دلیل توسعه‌ی بیشتر مساحت سطوح گسیختگی (که تأمین‌کننده مقاومت برشی در برابر گسیختگی می‌باشد) در مدل‌های طولیتر نسبت به مدل‌های کوچکتر می‌باشد. در مدل‌های ۳۵ و ۷۰ سانتیمتری، مساحت سطوح گسیختگی اختلاف زیادی با هم داشته در حالی که اختلاف بین مساحت سطوح گسیختگی در مدل‌های ۷۰ و ۱۴۰ سانتیمتری مقدار کمی می‌باشد.

۴- در مراحل اولیه بارگذاری، انحراف دیواره گود در بخش‌های فوقانی، در مقایسه با اعماق پائینتر بیشتر بوده ولی با پیشرفت بارگذاری و افزایش سطح تنش، این نمودارها به حالت مقعر (کاسه‌ای) درآمده‌اند؛ به گونه‌ای که تغییرشکل حداکثر، بطور تقریبی در یک سوم فوقانی گود اتفاق افتاده است. همچنین نقطه وقوع حداکثر تغییرشکل در هر سه مدل در ارتفاع یکسانی از تاج قرار گرفته است. قابل ذکر است که مدل‌های کوچکتر میزان تقعر بیشتری نسبت به مدل‌های طولیتر دارا می‌باشند.

۵- بر اساس نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که عدد PSR علاوه بر تأثیرپذیری از هندسه و ابعاد گود (مطابق آنچه که در پیشینه پژوهش اشاره گردید)، از میزان سربار وارده به گود نیز تأثیر می‌پذیرد؛ به گونه‌ای که با افزایش سطح تنش و نزدیک شدن به وقوع گسیختگی، این مقدار کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، تفاوت بین مدل سه‌بعدی و دوبعدی در این شرایط بیشتر نمایان می‌شود. همچنین مشاهده شد که عدد PSR برای تغییرشکل‌های افقی ثبت شده در تاج گود، نسبت به نشست‌های مجاور تاج، از مقادیر کمتری برخوردار است.

سپاسگزاری

پژوهش اخیر بخشی از یک طرح تحقیقاتی گسترده بوده که در اینجا لازم است از حمایت‌های مسئولین آزمایشگاه ژئوتکنیک تحصیلات تکمیلی دانشگاه رازی و دانشگاه صنعتی کرمانشاه و مساعدت‌های بی‌دریغ مدیریت و کارشناسان بخش ژئوتکنیک مهندسی مشاور ژئوتکنیک عمران آزمایشگاهی رازی و آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک بیستون تشکر و قدردانی گردد. همچنین از مسئول و کارشناس آزمایشگاه مدل‌سازی فیزیکی دانشکده فنی دانشگاه تهران که علاوه بر فراهم آوردن امکان بازدید از مجموعه آزمایشگاه، نویسنده مقاله را مورد راهنمایی و عنایت خویش قرار دادند، سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

- [1] Bhatkar, T., Barman, D., Mandal, A., & Usmani, A. (2017). Prediction of behaviour of a deep excavation in soft soil: a case study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1), 10-19.
- [2] Ahmadi, A., & Ahmadi, M. M. (2019). Three-dimensional numerical analysis of corner effect of an excavation supported by ground anchors. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-13.
- [3] Lin, D. G., & Woo, S. M. (2007). Three dimensional analyses of deep excavation in Taipei 101 construction project. *Journal of GeoEngineering*, 2(1), 29-42.
- [4] Ou, C. Y., Chiou, D. C., & Wu, T. S. (1996). Three-dimensional finite element analysis of deep excavations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 337-345.
- [5] Finno, R. J., Blackburn, J. T., & Roboski, J. F. (2007). Three-dimensional effects for supported excavations in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(1), 30-36.

- [6] Zdravkovic, L., Potts, D. M., & St John, H. D. (2005). Modelling of a 3D excavation in finite element analysis. *Geotechnique*, 55(7), 497-513.
- [7] Wu, C. H., Ou, C. Y., & Tung, N. C. (2010). Corner effects in deep excavations-establishment of a forecast model for taipei basin T2 zone. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(1), 1-11.
- [8] Razavi, S. K., Hajjalilue Bonab, M., Rezaei, A. H. (2018). Three Dimensional Finite Difference (3D FD) Analysis of Soil Nailing Wall. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Volume 48 (2018), Issue 1 (Spring), 23-33.
- [9] Shivaei, S., & Jahanandish, M. (2018). Numerical investigation of the three-dimensional performance of anchored reaction blocks in stability of excavations in clayey soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- [10] Hsiung, B. C. B., Yang, K. H., Aila, W., & Ge, L. (2018). Evaluation of the wall deflections of a deep excavation in Central Jakarta using three-dimensional modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 84-96.
- [11] Fakher, A. (2014). *Research Methods in Geotechnic*. Second Edition. Tehran: University of Tehran Press, Page(247).
- [12] Iai, S., Tobita, T., & Nakahara, T. (2005). Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests. *Geotechnique*, 55(5), 355-362.
- [13] Office of National Building Regulations (2013). *National Building Regulations –Section 7*. Third Edition. Tehran: Toseeh Iran Publisher, Page(69).
- [14] Panah, A. K., Yazdi, M., & Ghalandarzadeh, A. (2015). Shaking table tests on soil retaining walls reinforced by polymeric strips. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2), 148-161.
- [15] Moghadam, A. M., Ghalandarzadeh, A., Towhata, I., Moradi, M., Ebrahimian, B., & Hajjalikhani, P. (2009). Studying the effects of deformable panels on seismic displacement of gravity quay walls. *Ocean engineering*, 36(15-16), 1129-1148.
- [16] Zekri, A., Ghalandarzadeh, A., Ghasemi, P., & Aminfar, M. H. (2015). Experimental study of remediation measures of anchored sheet pile quay walls using soil compaction. *Ocean Engineering*, 93, 45-63.
- [17] Yazdandoust, M. (2017). Experimental study on seismic response of soil-nailed walls with permanent facing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98, 101-119.
- [18] Sabermahani, M., Ghalandarzadeh, A., & Fakher, A. (2009). Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 121-136.