



مطالعه آزمایشگاهی بر روی رفتار دیوار سازه نگهبان ناشی از گودبرداری در خاک ماسه‌ای با استفاده از مدلسازی فیزیکی

محمود عبدالمهدی^۱، جعفر بلوری بزاز^۲

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیار دانشکده مهندسی گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

bolouri@um.ac.ir

خلاصه

یکی از مهم ترین مسائل رایج در صنعت ساخت و ساز ساختمانی دنیای امروز، نیاز به گودبرداری های عمیق در مناطق متراکم شهری می باشد. گودها می توانند باعث انحراف جانبی دیوار و حرکت زمین شوند که ممکن است باعث آسیب به ساختمان ها و تجهیزات مجاور شود. لذا گودبرداری و سازه نگهبان به عنوان یکی از مسائل چالش برانگیز در مهندسی عمران به شمار می رود. ندر این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی دیوار حائل شمع درجا با مهاربندی انکراژ در خاک ماسه‌ای پرداخته شده است. در این آزمایشات، دو پارامتر تأثیر گذار بر رفتار دیوار مورد بررسی قرار گرفت. این دو پارامتر عبارتند از: وجود سربار در مجاورت گودبرداری و نیز، نحوه گیرداری انتهای شمع های سازه نگهبان در مدل مذکور. نتایج آزمایشات حاکی از آن است که نسبت بیشینه تغییر مکان جانبی دیوار (δ_{hm}) به عمق گودبرداری (H) در محدوده 0/30-0/145 قرار دارد. همچنین، نسبت بیشینه نشست سطح زمین (δ_{vm}) به عمق گودبرداری در محدوده 0/11-0/44 می باشد.

کلمات کلیدی: گودبرداری، مطالعه آزمایشگاهی، نشست زمین

1. مقدمه

گودبرداری های عمیق تأثیر بسزایی در تغییر توزیع تنش در لایه های خاک و همچنین جابجایی زمین دارند. گودها می توانند باعث انحراف جانبی دیوار و حرکت زمین شوند که ممکن است باعث آسیب به ساختمان ها و تجهیزات مجاور شود. لذا، عدم دقت در طرح، محاسبه و اجرای گودبرداری ها و سازه نگهبان های مهارکننده در مناطق شهری و در مجاورت ساختمان ها می تواند خسارات جانی و مالی گسترده ای در پی داشته باشد. لذا، گودبرداری و سازه نگهبان یکی از مسائل چالش برانگیز در مهندسی عمران به شمار می رود. بنابراین آنچه اهمیت دارد این است که تغییر شکل های نامطلوب زمین و جابجایی های به وجود آمده ناشی از گودبرداری های عمیق پیش بینی شوند تا اثرات و خسارت های این تغییر شکل ها به حداقل برسند. میزان و شکل جابجایی دیوار ناشی از گودبرداری های عمیق بستگی به عوامل متعددی از قبیل: شرایط خاک و سطح آب زیرزمینی، سربار، وجود و مجاورت سازه ها، روش های ساخت، نوع و روش نصب مهارها، فاصله و سختی مهارها، شرایط ژئوتکنیکی و غیره دارد. مطالعات زیادی بر روی رفتار دیوار بر اثر گودبرداری های عمیق پرداخته اند [1-4]. همچنین، چندین مطالعه در مورد جابجایی های زمین ناشی از گودبرداری در رس ها مورد بررسی قرار گرفته اند [5-7]، اما تعداد کمی گودبرداری در ماسه ها را مورد بررسی قرار داده اند [8-10]. یکی از روش های متداول در پایدارسازی و حفاظت جداره ها، استفاده از سیستم سازه نگهبان دیوار حائل شمع درجا با مهاربندی انکراژ می باشد. لذا در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی سیستم بیان شده در خاک ماسه‌ای پرداخته شده و رفتار مشاهده شده زمین و دیواره گود ناشی از گودبرداری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بنابراین، در این مقاله سعی شده است با انجام آزمون هایی در مقیاس آزمایشگاهی توسط مدلسازی فیزیکی، عملکرد دیواره گود، زمین و سازه های مجاور گود با توجه به پارامترهای تأثیر گذار بر روی آنها را مورد بررسی قرار دهیم.

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد

² دانشیار دانشکده مهندسی گروه عمران، عضو هیأت علمی دانشگاه فردوسی مشهد



2. مدل‌سازی و توصیف مدل فیزیکی

مدلسازی فیزیکی یکی از روش‌های معتبر برای بررسی این روش‌ها و تأیید صحت محاسبات می‌باشد. مدلسازی فیزیکی عبارت است از ساختن مدل مقیاس شده‌ای از ابنیه ژئوتکنیکی و انجام بارگذاری لازم بر روی آن برای شبیه سازی شرایط واقعی است. مدلسازی فیزیکی برای ارزیابی صحت تحلیل‌های عددی تنش - تغییر شکل و پایداری به کار می‌رود. روش‌های مدلسازی فیزیکی دو نوع می‌باشد؛ مدلسازی کوچک مقیاس و مدلسازی با دستگاه سانترفیوژ. در منابع فنی روابطی جهت انتخاب صحیح نسبت ابعادی وجود دارد که می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. استفاده از مدلسازی فیزیکی یا کوچک مقیاس روشی است که در مهندسی ژئوتکنیک سابقه‌ای دیرینه دارد. ون [11] اولین کسی بود که استفاده از مدل شمع را گزارش کرد و مطالعات خود را بر روی شمع‌های مایل و قائم متمرکز کرد. همچنین، مطالعاتی جهت بارگذاری جانبی شمع در خاک‌های چسبنده توسط مدل فیزیکی انجام شد [12]. آزمایشات استاتیکی و سایکلیک بر روی گروه‌های شمع مدفون در خاک‌های ماسه‌ای انجام و به این نتیجه رسیدند که اثر گروه برای زمانی که فاصله شمع‌ها بیش از هشت برابر قطر شمع باشد، ناچیز است [13].

همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی رفتار گودبرداری در خاک ماسه‌ای با استفاده از مدلسازی فیزیکی پرداخته خواهد شد. 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 دارای فضای کافی جهت بارگذاری سازه به عنوان سربار موجود در مجاورت محل گودبرداری می‌باشد. جداره‌های این جعبه توسط طلق‌های شفاف جهت مشاهده روند پیشروی آزمایشات پوشانده شده است.

از تعدادی لوله از جنس پلی پروپیلن جهت مدلسازی شمع‌های سیستم سازه نگهبان ذکر شده، استفاده شده است. جدول 1 مشخصات شمع‌های مدل فیزیکی را بیان می‌کند. این شمع‌ها به صورت مقیاس شده‌ای نسبت به مدل واقعی تهیه شده است. شایان ذکر است که مشخصات ارائه شده برای شمع در جدول 1 از برگه‌های اطلاعاتی³ تهیه شده از کارخانه سازنده می‌باشد. براساس سختی شمع‌ها و تشابه ابعادی، در نهایت با بررسی گزینه‌های موجود و همچنین داشتن اطلاعاتی نظیر ابعاد هندسی و مدول الاستیسیته مورد نظر، لوله‌های پروپیلن جهت انجام مدلسازی انتخاب گردیده است.

جدول 1- مشخصات شمع‌های مدلسازی

جنس	مدول الاستیسته (Gpa)	طول (mm)	قطر خارجی (mm)	قطر داخلی (mm)	ضخامت (mm)
پلی پروپیلن	2	800	40	26/6	6/7

جهت مدل کردن سربار مجاور گود، سازه‌ای مقیاس شده تهیه شده است. این سربار شامل در نظر گرفتن بارهای مرده و زنده‌ی سازه مجاور گود می‌باشد. لازم به ذکر است که با استفاده از روابط مدلسازی فیزیکی و تشابه ابعادی و با توجه به بارهای ذکر شده، اقدام به تهیه این مدل شده است. شایان ذکر است جهت مدل کردن مراحل گودبرداری، از 10 دریچه به ارتفاع 0/10 متر در قسمت جلوی جعبه آزمایش استفاده شده است. با برداشتن هریک از این دریچه‌ها، یک مرحله از گودبرداری مدل شده است. همچنین لازم به ذکر است که برای حفظ یکپارچگی شمع‌ها از یک تیر کلاهیک در قسمت بالایی شمع‌ها اجرا گردیده است.

جدول 2 مشخصات خاک ماسه‌ای مورد استفاده در مدلسازی فیزیکی می‌باشد. در این پژوهش از خاک ماسه فیروزکوه طبق مشخصات ارائه شده در جدول مذکور استفاده شده است. طبق طبقه‌بندی یونیفاید این خاک در رده خاک ماسه‌ای بدانه بندی (SP) شده قرار می‌گیرد.

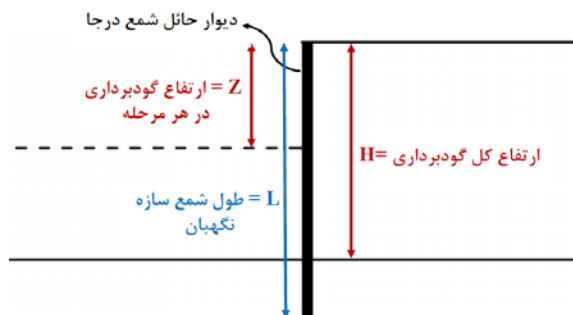
جدول 2- مشخصات خاک مورد استفاده

نوع خاک	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)	زاویه اصطکاک داخلی (Degree)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cc	Cu
ماسه 161 فیروزکوه	15.75	40	0.167	0.26	0.40	1.012	2.395

مشخصات ماسه فیروزکوه با استفاده از آزمایش‌های صورت گرفته در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده و در جدول 2 آورده شده است.

³ Data Sheet

شکل 1 تعریف نمادهای موجود و مقطع عرضی در گودبرداری را نشان می‌دهد. در گودبرداری از مفهوم پیشرفت گودبرداری استفاده می‌گردد. پیشرفت گودبرداری براساس نسبت ارتفاع گودبرداری در هر مرحله (Z) به ارتفاع کل گودبرداری (H) قابل تعریف است. همچنین طول کل شمع با L نشان داده می‌شود. طول کل شمع در مدلسازی فیزیکی برابر با یک متر می‌باشد. همچنین، فواصل بین شمع‌های سازه نگهبان برابر با 15 سانتی‌متر است. ($S=15$ cm)



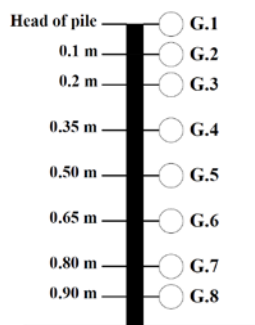
شکل 1- تعریف نمادها و مقطع عرضی گودبرداری

3. ابزار⁴

شکل 2 نمایشی از ابزارهای اندازه‌گیری تغییر مکان جانبی مورد استفاده در مدلسازی فیزیکی در پژوهش حاضر است. در مطالعات صورت گرفته در این مقاله از هشت عدد گیج اندازه‌گیری عقبه‌ای با دقت 0.01 mm ساخت شرکت ELE انگلستان بهره گرفته شده است. این گیج‌ها به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان جانبی دیوار حائل شمع درجا و انکراژ مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین لازم به ذکر است که جهت انتقال تغییر مکان حاصله از شمع‌ها به گیج‌های اندازه‌گیری از تعدادی سیم مفتولی نازک با انعطاف‌پذیری کم که در طول شمع مرکزی متصل است، به عنوان رابط بین دیوار و گیج‌ها استفاده گردیده است.



(ب)



(الف)

شکل 2- موقعیت قرارگیری گیج‌های اندازه‌گیری تغییر مکان جانبی (الف) نمایش شماتیک (ب) موقعیت گیج‌ها در مدل فیزیکی

شایان ذکر است که فواصل قائم نصب گیج‌ها به نحوی انتخاب و اجرا گردیده است که بتوان با داشتن تغییر مکان در کل طول شمع، پروفیل جابجایی دیوار را به نحو مطلوب ترسیم نمود تا نتایج آن قابل بحث و بررسی در کلیه آزمایشات صورت گرفته باشد. همچنین، جهت اندازه‌گیری نشست سطح زمین در مجاورت گودبرداری از ابزارهای موجود در آزمایشگاه استفاده شده است.

⁴ instruments

4. برنامه آزمایشات

به منظور دستیابی به اهداف ذکر شده در این پژوهش، تعداد آزمایشات و جزئیات هر آزمایش در جدول 3 آورده شده است. مجموعاً تعداد چهار آزمایش جهت بررسی رفتار دیوار و زمین مجاور ناشی از گودبرداری در خاک ماسه‌ای توسط مدلسازی فیزیکی انجام شده است.

جدول 3- شماره و جزئیات انجام هر آزمایش

شماره آزمایش	وضعیت سربار	وضعیت گیرداری انتهای شمع‌ها*	فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها (S)	نسبت فاصله به قطر شمع (S/D)
1	عدم وجود سربار در مجاورت گودبرداری	گیردار (بستر سخت)	15 cm	3.75
2	عدم وجود سربار در مجاورت گودبرداری	آزاد (بستر نرم)		
3	وجود سربار در مجاورت گودبرداری	گیردار (بستر سخت)		
4	وجود سربار در مجاورت گودبرداری	آزاد (بستر نرم)		

* در این پژوهش سعی شده است تا نتایج پایداری سیستم دیوار حائل شمع درجا در دو حالت انتهای گیردار (بستر سخت) و انتهای آزاد (بستر نرم) بررسی و مقایسه گردد. شکل 3، نمایشی از مدل کردن انتهای گیردار شمع‌ها می‌باشد. در حالت انتهای گیردار از یک صفحه فلزی که تعدادی لوله به طول و فواصل مشخص روی آن جوش داده شده جهت ایجاد گیرداری در انتهای شمع‌ها استفاده گردیده است. فواصل لوله‌های جوش داده شده بر روی صفحه فلزی برابر با فواصل مرکز به مرکز شمع‌ها یعنی 0/15 متر می‌باشد.



شکل 3- نحوه مدل کردن گیرداری انتهای شمع

5. تفسیر نتایج و بحث

در این بخش به بررسی پاسخ زمین و جابجایی دیوار ناشی از گودبرداری می‌پردازیم. توسط هشت عدد گیج نصب شده و ابزارهای اندازه‌گیری موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک، تغییر مکان‌های جانبی دیواره گود و نشست سطح زمین مجاور ناشی از گودبرداری ثبت و نتایج آن نیز جهت بحث و بررسی در قسمت‌های بعدی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

5-1. جابجایی جانبی دیوار

به هنگام گودبرداری، به دلیل تغییرات گسترده سطح تنش، دیواره گود تغییر شکل پیدا کرده و تغییر شکل‌هایی را به زمین مجاور و سازه‌های مجاور گود اعمال می‌کند. با تغییر شکل پیدا کردن سازه نگهدارنده، خاک پشت دیوار به سمت جلو و پایین حرکت می‌کند و سطح زمین دچار نشست می‌شود. بنابراین طبق توضیحات داده شده در ابتدا مشاهدات تغییر جانبی دیوار ناشی از گودبرداری را مورد بررسی قرار می‌دهیم. طبق نتایج به دست آمده از آزمایشات، این نکته قابل استخراج است که جابجایی جانبی دیوار با پیشرفت مراحل گودبرداری افزایش پیدا می‌کند. جدول 4 شامل بیشینه جابجایی جانبی دیوار در هر آزمایش است. همچنین در این جدول نسبت بیشینه تغییر مکان جانبی دیوار (δ_{hm}) به عمق گودبرداری (H) نیز بیان شده است. نسبت (δ_{hm}/H) حاصل از نتایج آزمایشات این پژوهش مطابق با مشاهدات صورت گرفته توسط محققین مختلف می‌باشد [8, 14, 15].

توجه: شایان ذکر است شماره آزمایش نوشته شده در ستون اول واقع در جدول 4، مطابق با شماره آزمایش و جزئیات انجام آزمایش در جدول 3 می‌باشد. لذا از آوردن مجدد مشخصات هر آزمایش در جدول 4 خودداری شده و فقط شماره هر آزمایش در این جدول آورده شده است.



جدول 4- بیشینه جابجایی جانبی دیوار در هر آزمایش

نسبت بیشینه تغییر مکان جانبی دیوار به عمق گودبرداری - δ_{hm}/H	عمق گودبرداری - H	بیشینه تغییر مکان جانبی دیوار - δ_{hm}	شماره آزمایش
0.23	800 mm	1.84 mm	1
0.145		1.16 mm	2
0.30		2.4 mm	3
0.17		1.34 mm	4

5-2. نشست سطح زمین مجاور

در این بخش مشاهدات نشست سطح زمین ناشی از گودبرداری را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به ابزارهای اندازه‌گیری، بیشینه نشست سطح زمین (δ_{vm}) پس از اتمام مراحل گودبرداری نیز برداشت شده است. این مقادیر در جدول 5 برای تمامی آزمایشات انجام شده در این پژوهش آورده شده است. همچنین در این جدول نسبت بیشینه نشست سطح زمین (δ_{vm}) به عمق گودبرداری (H) نیز بیان شده است. نسبت (δ_{vm}/H) حاصل از نتایج آزمایشات این پژوهش مطابق با مشاهدات صورت گرفته توسط محققین مختلف می‌باشد [14-16]

جدول 5- بیشینه نشست سطح زمین در هر آزمایش

نسبت بیشینه نشست سطح زمین به عمق گودبرداری - δ_{vm}/H	عمق گودبرداری - H	بیشینه نشست سطح زمین - δ_{vm}	شماره آزمایش
0.21	800 mm	1.7 mm	1
0.11		0.9 mm	2
0.44		3.5 mm	3
0.29		2.3 mm	4

شایان ذکر است که با افزایش عمق گودبرداری و یا به عبارت دیگر با پیشرفت مراحل گودبرداری، مقدار نشست سطح زمین (δ_{vm}) افزایش پیدا می‌کند.

6. نتیجه‌گیری

- در این پژوهش به مطالعه بر روی رفتار دیوار ناشی از گودبرداری در ماسه توسط مدلسازی فیزیکی پرداخته شد. در این مدل از دیوار حائل شمع درجا و انکراژ به عنوان سیستم سازه نگهبان استفاده شد.
- برای مدل کردن گیرداری انتهای شمع‌ها از یک صفحه فلزی که روی آن تعدادی لوله جوش داده شده، استفاده گردیده است.
- رفتار گودبرداری در مدلسازی فیزیکی توسط دو پارامتر تأثیرگذار؛ وجود سربار در کنار گود و گیرداری انتهای شمع مورد بررسی قرار گرفت.
- با پیشرفت مراحل گودبرداری، میزان جابجایی جانبی دیواره گود و همچنین، میزان نشست سطح زمین افزایش پیدا می‌کند.
- نتایج آزمایشات حاکی از آن است که نسبت بیشینه تغییر مکان جانبی دیوار به عمق گودبرداری (δ_{hm}/H) در محدوده 0/145-0/30 قرار دارد. این نسبت مطابق با مشاهدات و نتایج آزمایشات گزارش شده توسط محققین برجسته دنیا دارد.
- نتایج آزمایشات در این پژوهش بیان‌گر آن است که نسبت بیشینه نشست سطح زمین به عمق گودبرداری (δ_{vm}/H) در محدوده 0/11-0/44 قرار دارد که این نسبت مطابق با مشاهدات و نتایج آزمایشات گزارش شده توسط محققین برجسته دارد.

7. قدردانی



در پایان بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای حسینی "مسئول آزمایشگاه سازه دانشگاه فردوسی مشهد" بابت تمامی زحمتهایی که برای دانشجویان و به خصوص اینجانب کشیده‌اند، نهایت تشکر و قدردانی را بنمایم و امیدوارم در پناه حق تعالی در تمامی عرصه‌های زندگی موفق و پیروز باشند.

8. مراجع

- [1] Ou C-Y, Chiou D-C, Wu T-S. "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations". Journal of Geotechnical Engineering. 1996;122(5):337-45.
- [2] Kung GT, Juang CH, Hsiao EC, Hashash YM. "Simplified Model for Wall Deflection and Ground-Surface Settlement Caused by Braced Excavation in Clays". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2007;133(6):731-47.
- [3] Khoiri M, Ou C-Y. "Evaluation of deformation parameter for deep excavation in sand through case histories". Computers and Geotechnics. 2013;47(57-67).
- [4] Finno RJ, Arboleda-Monsalve LG, Sarabia F. "Observed Performance of the One Museum Park West Excavation". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2015;141(1):04014078.
- [5] Finno RJ, Atmatzidis DK, Perkins SB. "Observed Performance of a Deep Excavation in Clay". Journal of Geotechnical Engineering. 1989;115(8):1045-64.
- [6] Hwang RN, Moh Z-C, Wang CH. "Performance of wall systems during excavation for core pacific city". Journal of GeoEngineering. 2007;2(2):53-60.
- [7] Liu GB, Ng CW, Wang ZW. "Observed Performance of a Deep Multistrutted Excavation in Shanghai Soft Clays". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2005;131(8):1004-13.
- [8] Hsiung B-CB. "A case study on the behaviour of a deep excavation in sand". Computers and Geotechnics. 2009;36(4):665-75.
- [9] Nikolinakou MA, Whittle AJ, Savidis S, Schran U. "Prediction and Interpretation of the Performance of a Deep Excavation in Berlin Sand". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2011;137(11):1047-61.
- [10] Hsiung B-CB, Yang K-H, Aila W, Hung C. "Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands". Computers and Geotechnics. 2016;80(138-51).
- [11] Wen RK. "MODEL STUDIES OF LATERALLY LOADED PILE FOUNDATIONS". Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington, D.C.1955. p. 140-52.
- [12] Matlock H, Repperger EA. "Theoretical Analysis and Laboratory Studies of Laterally Loaded Model Pile Segments". Report to Shell oil Co., Austin, Tex.1957.
- [13] Prakash S. "Behavior of pile groups subjected to lateral loads": University of Illinois at Urbana-Champaign, 1962.
- [14] Long M. "Database for Retaining Wall and Ground Movements due to Deep Excavations". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001;127(3):203-24.
- [15] Wang JH, Xu ZH, Wang WD. "Wall and Ground Movements due to Deep Excavations in Shanghai Soft Soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2010;136(7):985-94.
- [16] Wong IH, Poh TY, Chuah HL. "Performance of Excavations for Depressed Expressway in Singapore". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1997;123(7):617-25.