

A. Ghanbari*

Department of Civil
Engineering, Kharazmi
University, Tehran, Iran.

e-mail: ghanbari@khu.ac.ir

S. A. Mousavi Moallem

Department of Civil
Engineering, Kharazmi
University, Tehran, Iran.

e-mail:
sar.mousavi.moallem@gmail.com

Design Charts for Estimating Response of R.C. Frame Building Adjacent to Deep Excavation Supported by Soil-Nailing Method

Excavation-induced displacements may cause damage to buildings and urban facilities. The displacement of walls is inevitable in soil nailing method to mobilize the tensile force in steel elements. FEM-based numerical analyses in MIDAS GTS NX were used to evaluate the response of a concrete building adjacent to deep excavation. The effect of various parameters of the concrete frame building, including the number of stories, distance to excavation, and the excavation stabilized by soil nailing at different depths was investigated in the building adjacent to the excavation. The design charts represent the foundation settlement, building rotation, excess axial stress in the concrete columns, and the excavation-induced shear strain in masonry infill walls. According to the results, the presence of a building can cause significant changes in the deformation profile of the ground surface. Results showed the adjacent buildings that are located at the excavation edge and a distance equal to the excavation depth experience the maximum displacement. The excess axial stress in the concrete columns of the building adjacent to the excavation was negligible. Furthermore, with increasing foundation depth, settlement and rotation of the building decreases. This study showed that the axial stress of the building column adjacent to the excavation due to excavation is less than 5% of the compressive strength of concrete. Most displacement in buildings adjacent to the pit occurs when the building is on the edge of the excavation. At a distance of 4 times the depth of the excavation from the edge, the settlement is insignificant.

Keywords: R.C. Frame Building, Deep Excavation, Soil-Nailing, Deformation, Midas.

* Corresponding author

Received 28 August 2021, Revised 30 November 2021, Accepted 08 December 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7217.1278

نمودارهای طراحی برای تخمین پاسخ ساختمان بتنی مجاور گود عمیق پایدار شده به روش میخ‌کوبی

با توجه به نیاز بیش از پیش به گودبرداری در مناطق شهری، حفظ پایداری و جلوگیری از آسیب به ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور، عملیات گودبرداری با استفاده از سیستم‌های پایدارساز جداره گود ضروری است. یکی از روش‌های محبوب جهت پایداری جداره‌های گود، سیستم میخ‌کوبی است. در این روش به منظور بسیج شدن نیروی کششی در المان‌های فولادی، جابه‌جایی دیواره اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش از تحلیل‌های عددی مبتنی بر روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار MIDAS GTS NX جهت بررسی پاسخ ساختمان بتنی مجاور گود سوده برده شده است. در ادامه، اثر شرایط مختلف ساختمان اسکلت بتنی از جمله تعداد طبقات و فاصله آن از عملیات گودبرداری و گود پایدار شده به روش میخ‌کوبی با عمق‌های مختلف بر وضعیت ساختمان مجاور گود مورد مطالعه قرار گرفته است. نمودارهای ارائه شده در این مقاله، بیانگر میزان نشست فونداسیون، چرخش ساختمان، اضافه تنش محوری به‌وجود آمده در ستون‌های بتنی و کرنش برشی ناشی از گودبرداری در دیوارهای میان‌قابی از جنس مصالح بنایی هستند. این مطالعه نشان داد که اضافه تنش محوری ستون ساختمان مجاور گود در اثر عملیات گودبرداری کمتر از ۵ درصد مقاومت فشاری بتن بوده و قابل صرف‌نظر است. بیشترین تغییرمکان در ساختمان‌های مجاور گود به ترتیب در شرایطی رخ می‌دهد که ساختمان در لبه گود و در فاصله‌ای به اندازه عمق گود قرار گرفته باشند. نشست در فاصله‌ای به اندازه دو برابر عمق گود از لبه آن کمتر از ۱۰ درصد نشست حداکثر و در فاصله چهار برابر عمق گود از لبه آن ناچیز است.

واژگان کلیدی: گودبرداری، میخ‌کوبی، ساختمان بتنی، مدل‌سازی عددی، MIDAS GTS NX.

علی قنبری*
استاد، گروه مهندسی عمران،
دانشگاه خوارزمی.
پست الکترونیک:
ghanbari@khu.ac.ir

سید علیرضا موسوی
معلم
کارشناسی ارشد، گروه مهندسی
عمران، دانشگاه خوارزمی.
پست الکترونیک:
sar.mousavi.moallem@gmail.com

۱- مقدمه

ساختمان‌ها لازم است تا از ساختمان و تأسیسات مجاور گود در برابر صدمات احتمالی نیز محافظت شده تا از آسیب‌های مالی و جانی جلوگیری شود. در این شرایط، گودبرداری می‌تواند به یک دغدغه و پیچیدگی برای مهندسان چه از نظر اجرا و چه از نظر ایمنی مشکل‌ساز شود. هرچه گودبرداری عمیق‌تر و در مقیاس بزرگتر انجام شود؛ شناسایی‌های صورت گرفته بر روی خاک محدودتر باشد و سازه‌ها و امکانات مجاور گود در شرایط خطرناک‌تری قرار داشته باشند؛ محققان، طراحان و مجریان با چالش‌های بزرگتری روبرو خواهند شد. در نتیجه لازم است تا از گسیختگی و تغییرمکان‌های نایمن در حین عملیات گودبرداری جلوگیری شود.

گسترش سریع شهرها و رشد جمعیت در مناطق شهری و نیاز به سازه‌های زیرزمینی مانند پارکینگ‌های زیرزمینی، تونل‌ها، ایستگاه‌های مترو و تأسیسات و خدمات بیشتر در شهرها، گودبرداری عمیق را تبدیل به امری اجتناب‌ناپذیر کرده است. اهمیت موضوع در مناطق متراکم شهری دو چندان است، زیرا به دلیل تراکم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۰۶، بازنگری ۱۴۰۰/۰۹/۰۶، پذیرش ۱۴۰۰/۰۹/۱۷.
(DOI): 10.22091/cer.2021.7217.1278 شناسه دیجیتال

است. به عنوان مثال، نتایج پژوهش فاینو^۱ و همکاران، هالیم و وونگ^۲، تان^۳ و همکاران و ونگ^۴ و همکاران، از جمله مطالعات صحرایی است. آن‌ها با نصب ابزار اندازه‌گیری بر روی نقاط مهم همچون تاج دیواره گود، دیوارهای خارجی و پای ستون‌های سازه مجاور، مقادیر جابه‌جایی و چرخش را به‌صورت مستقیم ثبت کرده‌اند. در این دسته از پژوهش‌ها موضوعاتی چون فاصله، جنس و نوع سازه و فونداسیون، ارتفاع ساختمان، روش پایدارسازی جداره گود، جنس خاک و ترک‌های ناشی از گودبرداری در ساختمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۳-۶]. در بخشی دیگر از پژوهش‌ها با مدل‌سازی عملیات گودبرداری و سازه مجاور آن در آزمایشگاه به بررسی اثرات گودبرداری بر روی سازه پرداخته شده است. در این پژوهش‌ها، تغییرمکان‌ها و تغییرات تنش در المان‌های سازه مجاور در هر مرحله از گودبرداری ثبت و گزارش شده است. همچنین اثرات عمق گود، سطوح تماس، نوع شالوده، عمق استقرار سازه و سایر متغیرها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این دسته پژوهش‌ها، تغییرشکل‌های دیواره گود و سازه در هر مرحله از گودبرداری، ترک‌های به‌وجود آمده در سازه و تغییرات تنش و لنگر در اعضای سازه‌ای به عنوان نتایج، گزارش شده‌اند [۷-۹]. گروهی دیگر از محققان با مدل‌سازی گود و ساختمان‌های اطراف در نرم‌افزارهای مبتنی بر روش اجزای محدود به پیش‌بینی مقادیر جابه‌جایی و تغییرات تنش ناشی از گودبرداری پرداخته‌اند. در این دسته با توجه به ارزان، سریع و قابل تکرار بودن تحلیل، امکان بررسی عوامل مختلف وجود دارد. به همین دلیل اثر متغیرهایی چون عمق گودبرداری، روش پایدارسازی، جنس سازه مجاور گود و سختی و نوع شالوده آن بررسی شده‌اند. در نتایج این دسته از پژوهش‌ها پایدارسازی گود، سطوح و شدت خرابی، تغییرمکان

گودبرداری‌های عمیق به‌خصوص در خاک‌های نرم می‌توانند بر روی المان‌های سازه‌های ساختمان‌های مجاور گود تأثیر بگذارند [۱]. از این‌رو، مهندسان طراح ژئوتکنیک همواره سعی در تخمین میزان تغییرمکان ناشی از عملیات گودبرداری عمیق و اثر آن بر ساختمان‌های اطراف گود دارند.

امروزه روش میخ‌کوبی به یک روش قابل اعتماد و کاربردی جهت پایدارسازی جداره گود (به خصوص در شیب‌های قائم) در محیط شهری تبدیل شده است. با استفاده از این روش، دیواره شاتکریت مسلح شده با شبکه میلگرد توسط میخ‌ها به پشت دوخته می‌شود. در این شرایط، میخ‌ها با پیشرفت گودبرداری به صورت مقاوم عمل کرده و ناحیه‌ای از خاک پشت دیواره، حالت محرک می‌یابد. در این روش به دلیل انجام پایدارسازی به روش مرحله به مرحله لازم است تا جداره به عمق ۱ تا ۲ متر بدون هیچ سیستم نگهدارنده‌ای پایدار بماند. در این شرایط ابتدا با استفاده از پوشش شاتکریت، جداره را از ریزش‌های موضعی ایمن می‌نمایند. ضخامت شاتکریت بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر است. سپس با استفاده از دستگاه‌های حفار، چاله‌ای تقریباً افقی به طول موردنیاز حفاری شده و میخ‌ها درون چاله قرار می‌گیرند. در مرحله بعد بایستی دوغاب به چاله تزریق شود. لازم است میخ‌ها در مرکز چاله قرار گرفته تا دوغاب اطراف آن‌ها را بپوشاند. این مراحل تا انتهای تراز موردنیاز جهت گودبرداری ادامه پیدا می‌کند. طول میخ‌ها، قطر و زاویه نسبت به افق چاله براساس آیین‌نامه‌های موجود طراحی می‌شوند. عواملی از جمله مشخصات خاک، قطر، طول و سختی میخ‌ها، سختی شاتکریت، عمق گود، مراحل انجام، تماس بین میخ‌ها و جداره و غیره بر رفتار دیواره میخ‌کوبی شده تأثیرگذار هستند [۲].

با توجه به اهمیت حفاظت از ساختمان‌ها و امکانات مجاور عملیات گودبرداری پژوهشگران به بررسی رفتار گود و ساختمان‌های اطراف آن پرداخته‌اند. دسته‌ای از تحقیقات به روش میدانی و مطالعه در محل عملیات بوده

1- Finno

2- Halim and Wong

3- Tan

4- Wang

مدلسازی، اثر همزمان متغیرهایی چون تعداد طبقه‌های ساختمان، عمق گود، عمق استقرار پی، فاصله ساختمان از عملیات گودبرداری در نظر گرفته شده است. همچنین با در نظرگیری اندرکنش سازه مجاور گود و خاک و اثر آن بر روی پاسخ ساختمان مجاور به مدلسازی عددی به روش اجزای محدود پرداخته شده است. در شکل ۱، مقطع مدل ساخته شده در نرم‌افزار نمایش داده شده است.

طراحی مدل‌های ساخته شده در این تحقیق با استفاده از ضوابط آیین‌نامه FHWA انجام شده است [۱۲]. همچنین با استفاده از تحلیل‌های تعادل حدی ضریب اطمینان پایداری گودها نیز کنترل شده است. جهت انجام تحلیل‌های عددی متغیرهایی در نظر گرفته شده است که در جدول ۱ مشخص شده‌اند.

ابعاد ساختمان بتنی مجاور گود در پلان 12×12 مترمربع و با چهار ستون در هر ضلع است. ابعاد تیرها و ستون‌ها در شرایط مختلف ساختمان 45×45 سانتی‌متر مربع هستند. فولادگذاری مقاطع یادشده در شکل ۲ مشخص است. مدلسازی المان‌های سازه‌ای به صورت سختی معادل انجام شده است. به هر طبقه از ساختمان تنش ۲ کیلوپاسکال اعمال شده است. شالوده ساختمان در شرایط مختلف در پلان با ابعاد 13×13 مترمربع و با ضخامت یک متر مدلسازی شده است.

۲-۱- فرضیات روش اجزای محدود (FEM)

در این پژوهش که از روش اجزای محدود در انجام تحلیل‌های عددی سود برده شده، فرضیاتی در نظر گرفته شده است. در این مدل‌ها به جز ساختمان مورد بررسی، سربار دیگری در اطراف گود وجود ندارد. حرکت لبه‌های قائم مدل در جهت افقی و لبه‌های افقی در دو جهت قائم و افقی محدود شده‌اند. جهت اطمینان از صحت پاسخ‌ها و با توجه به تغییرات بیشتر تنش و تغییرمکان قابل توجه در نزدیکی گود و ساختمان نسبت به سایر محدوده‌های مدل، مش‌بندی در محدوده‌های یاد شده ریزتر است. با افزایش فاصله از جداره گود و ساختمان، ابعاد المان‌ها

در نقاط حساس سازه مجاور گود، نوع و جهت گسترش ترک‌های سازه پس از گودبرداری مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند [۲، ۱۰ و ۱۱]. برایسون و کوتیمر^۵ ساختمان مجاور گود را به صورت سه‌بعدی و با استفاده از روش اجزای محدود مدلسازی نمودند. آن‌ها بدون مدلسازی خاک، اثرات گودبرداری را با اعمال جابه‌جایی به فونداسیون ساختمان در نظر گرفته، سپس از تحلیل کرنش نقاط حساس را با کرنش ترک‌خوردگی مقایسه نمودند [۱۰]. دانگ^۶ با اضافه کردن مدل رفتاری سخت‌شونده به نرم‌افزار آباکوس به مدلسازی سه‌بعدی عملیات گودبرداری در مجاورت چند ساختمان پرداخت. او در قالب رساله دکتری اثرات گودبرداری بر روی ساختمان‌های مجاور از جمله نشست و چرخش را بررسی نمود [۱۱]. در پژوهشی دیگر، با مدلسازی عددی گود پایدارشده به روش میخ‌کوبی، اثرات متغیرهای گود از جمله پارامترهای مقاومتی خاک، عمق گود و سربار بر روی تغییرمکان‌های ناشی از گودبرداری مورد مطالعه قرار گرفت. در نتایج، محققان نمودارهایی جهت تخمین جابه‌جایی‌های ناشی از گودبرداری با استفاده از زاویه اصطکاک داخلی خاک، سربار و عمق گود ارائه کرده‌اند [۲].

با توجه به بررسی‌های پژوهشگران گذشته، در این تحقیق سعی شده است با بررسی نشست فونداسیون، چرخش ساختمان، اضافه تنش در المان‌های سازه‌ای و کرنش المان‌های غیرسازه‌ای و ارائه نمودارهایی جهت تخمین پاسخ ساختمان بتنی مجاور گود، به بهبود نتایج مطالعات گذشته کمک گردد.

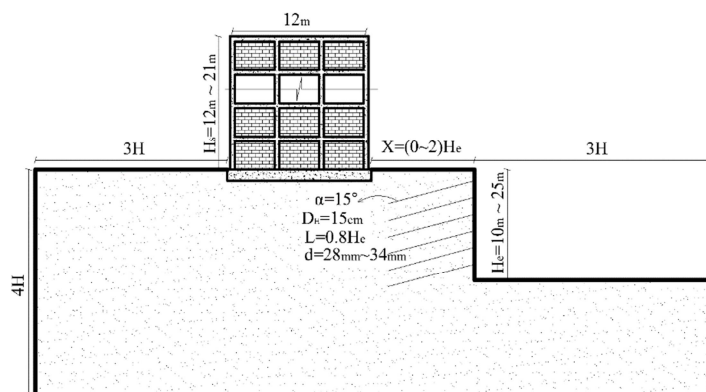
۲- تحلیل‌های عددی

در این تحقیق، اجزای سازه و دیوارهای میانقابی به صورت کامل و سه‌بعدی مدلسازی شده‌اند. در فرآیند

^۵- Bryson and Kotheimer

^۶- Dong

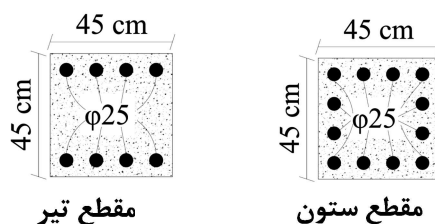
افزایش پیدا کرده است. تعداد مدل‌های ساخته شده در این پژوهش ۲۴۰ مدل است.



شکل ۱- مقطع مدل ساخته شده در نرم‌افزار

جدول ۱- متغیرهای در نظر گرفته شده در این پژوهش

متغیر	مقدار	نماد در نظر گرفته شده
عمق گود	۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر	H_e
عمق استقرار پی	۱، ۳ و ۶ متر	D
فاصله ساختمان از لبه گود	صفر (۰/۵ متر)، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برابر عمق گود	X
ارتفاع طبقات ساختمان مجاور گود	۴، ۵، ۶ و ۷ (ارتفاع هر طبقه سه متر)	H_s



شکل ۲- مقطع المان‌های سازه‌ای ساخته شده در نرم‌افزار

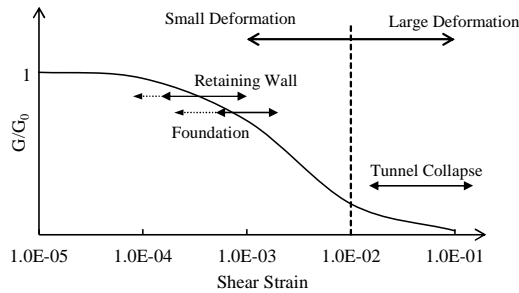
۲-۲- مصالح استفاده شده

با توجه به بررسی همزمان ساختمان و گود در عملیات گودبرداری در پژوهش حاضر، از مصالح سازه‌ای و خاک به طور همزمان استفاده شده است. علاوه بر خاک، از بتن جهت مدل‌سازی سازه، پی و شاتکریت، از مصالح بنایی جهت مدل‌سازی دیوارهای پیرامونی، از المان‌های سطح تماس جهت مدل‌سازی سطوح تماس بین خاک و بتن و از فولاد جهت مدل‌سازی میخ‌ها استفاده شده است. رفتار خاک تأثیر بسزایی بر پاسخ گودهای عمیق دارد. از این‌رو، جهت استخراج پاسخ‌های قابل اعتماد از تحلیل‌های مبتنی بر روش حل اجزای محدود، لازم است تا از مدل رفتاری واقع‌بینانه‌ای استفاده شود. مدل رفتاری

HS-Small با در نظرگیری رفتار غیرخطی خاک در کرنش‌های کوچک، رفتار واقع بینانه‌تری از خاک حین بارگذاری یا باربرداری ارائه می‌کند [۱۳]. در شکل ۳ محدوده کرنش‌های برشی پیش‌بینی شده در مدل‌سازی دیوارهای حائل و فونداسیون مشخص شده‌اند. با توجه به شکل ۳، مشخص است که محدوده کرنش‌های یاد شده در محدوده تغییرشکل‌های کوچک قرار می‌گیرند. بدین ترتیب به دلیل در نظرگیری رفتار غیرخطی برای خاک در مدل رفتاری HS-Small در تغییرشکل‌های کوچک، از این مدل رفتاری جهت مدل‌سازی خاک سود برده شده است.

در این تحقیق خاک ماسه‌ای که به دست آمده از منطقه ۱۳ شهرداری تهران است؛ به صورت همگن،

وضعیت تسلیم شدگی بتن حین گودبرداری امری ضروری است. از این رو از مدل رفتاری موهر- کولمب جهت مدل سازی بتن مسلح استفاده شده است. این مدل رفتاری دارای دو بخش الاستیک و پلاستیک کامل است.



شکل ۳- کرنش های پیش بینی شده در مدل سازی های ژئوتکنیکی

الاستوپلاستیک و ثابت از نظر جنس و پارامترهای مقاومتی و سختی فرض و مقادیر آن در جدول ۲ ارائه گردیده است. مشخصات خاک در این تحلیل از نتایج پژوهش قنبری استخراج شده است [۱۴].

در جدول ۲، γ وزن مخصوص طبیعی، ν نسبت پواسون، E_{50ref} مدول الاستیسیته سکانتی، E_{oedref} مدول الاستیسیته محصورشدگی، E_{urref} مدول الاستیسیته باربرداری، R_f نسبت گسیختگی، P_{ref} تنش مرجع، m نسبت سطح تنش، ϕ زاویه اصطکاک داخلی، ψ زاویه اتساع و c چسبندگی است.

باتوجه به نیاز به بررسی دقیق رفتار ساختمان مجاور عملیات گودبرداری، استفاده از مدل رفتاری و در نظرگیری رفتار مصالح در شرایط پلاستیک، جهت بررسی

جدول ۲- مشخصات خاک [۱۴]

c (kPa)	ψ (degree)	ϕ (degree)	m	P_{ref} (kPa)	R_f	E_{urref} (MPa)	E_{oedref} (MPa)	E_{50ref} (MPa)	ν	γ (kN/m ³)
۱۰	۶	۳۶	۰/۷۵	۱۰۰	۰/۹	۱۳۵	۴۵	۴۵	۰/۳	۱۸

که در آن، c_c چسبندگی بتن، f'_c مقاومت فشاری تک محوره بتن و ϕ_c زاویه اصطکاک داخلی بتن می باشند. در این پژوهش، مقاومت فشاری تک محوری بتن ۳۰ مگاپاسکال و در شرایط بدون بارگذاری جانبی فرض شده است. مقاومت کششی بتن نیز برابر ۱۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری آن در نظر گرفته شده است. مشخصات کامل بتن در جدول ۳ ارائه شده است [۱۵].

در سال ۲۰۱۶، مدل سازی بتن مسلح با استفاده از مدل رفتاری موهر- کولمب مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، زاویه اصطکاک داخلی بتن، وابسته به تنش همه جانبه دانسته شده و در صورت نبود بارگذاری جانبی، زاویه اصطکاک داخلی برابر ۳۵ درجه پیشنهاد شده است. همچنین جهت محاسبه چسبندگی بتن، در شرایط بدون بارگذاری جانبی، رابطه (۱) ارائه شده است [۱۵]:

$$c_c = \frac{f'_c (1 - \sin \phi_c)}{2 \cos \phi_c} \quad (1)$$

جدول ۳- مشخصات بتن مسلح [۱۵]

مدول الاستیسیته فولاد (MPa)	مقاومت تسلیم فولاد (MPa)	وزن مخصوص بتن (kN/m ³)	مدول الاستیسیته بتن (MPa)	نسبت پواسون بتن	مقاومت کششی بتن (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری بتن (MPa)
۲۰۰۰۰۰	۴۲۰۰	۲۵	۲۸۰۰۰	۰/۱۵	۳	۳۰

مدل سازی شده اند. در این روش مدل سازی، دیوار یکپارچه و با مشخصات واحد جایگزین مدل سازی آجر، ملات و

در این پژوهش، دیوارهای میانقابی داخلی و پیرامونی از جنس مصالح بنایی با استفاده از روش ماکرو،

جدول ۴ جهت مدل‌سازی دیوار بنایی با مدل رفتاری موهر- کولمب ارائه گردید. در این تحقیق، ضخامت میانقاب‌های پیرامونی ۲۰ سانتی‌متر و میانقاب‌های داخلی ۱۰ سانتی‌متر است [۱۷].

سطح تماس بین آجر و ملات می‌گردد. کریمی و همکاران، نشان دادند که نتایج حاصل از روش ماکرو با مدل واقعی و مدل عددی ساخته شده با روش میکرو با تقریب قابل قبولی نزدیک به یکدیگر است [۱۶].

در تحقیقی دیگر، با مدل‌سازی دیوار بنایی به روش ماکرو و بررسی رفتار آن تحت برش، مقادیر ارائه شده در

جدول ۴- مشخصات دیوارهای میان‌قابی از جنس مصالح بنایی [۱۷]

زاویه اصطکاک داخلی مصالح بنایی (degree)	چسبندگی مصالح بنایی (kN/m ²)	مدول الاستیسیته مصالح بنایی (MPa)	نسبت پواسون مصالح بنایی	وزن مخصوص مصالح بنایی (kN/m ³)
۱۱/۳	۱۳۰	۱۰۵۰	۰/۱۵	۲۵

ردیف با نیروی پیش‌تنیدگی ۲۰۰ کیلونیوتن اجرا شده‌اند. عمق جداره گود ۱۴/۳۵ متر و در سه لایه است. سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز کف گود بوده و از اثر سطح آب زیرزمینی صرف‌نظر شده است. در این پروژه، چند انحراف‌سنج جهت قرائت تغییرمکان‌ها در محیط عملیات گودبرداری نصب شده است. مشخصات لایه‌های خاک، نیل، انکر و شاتکریت در جدول ۵ ارائه شده است. نمای کلی از مدل ساخته شده جهت صحت‌سنجی و مقایسه بین نتایج برداشت شده از پروژه واقعی و مدل‌سازی عددی در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به گراف ارائه شده از مقایسه نتایج مشخص است که میزان اختلاف نتایج کمتر از ۱۰ درصد است.

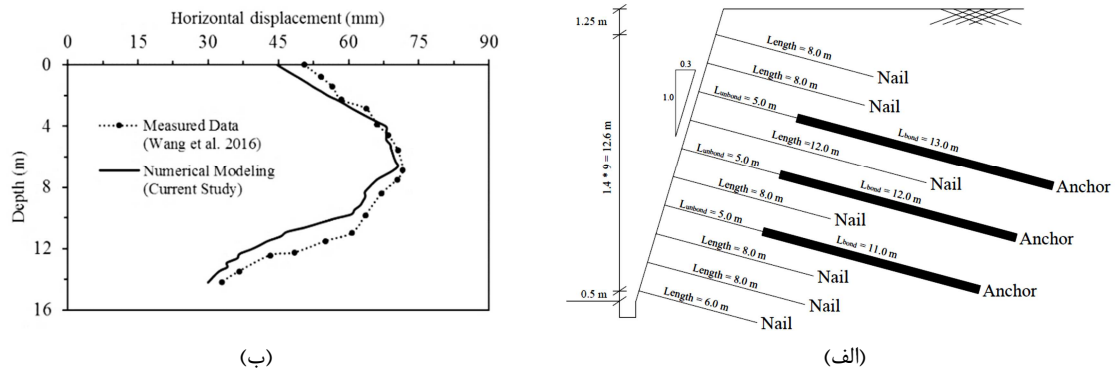
به عنوان دومین مطالعه جهت صحت‌سنجی از مطالعه عبداللهی و بلوری بزاز استفاده شده است. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی رفتار گود پایدار شده به روش سیستم ترکیبی شمع و انکراژ در خاک ماسه‌ای پرداخته شده است [۹]. در این تحقیق، شرایط مختلف گود و سربار بررسی شده است. جهت صحت‌سنجی، شرایط گود بدون سربار در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی عددی این مطالعه در مرحله اول مدل‌سازی تنش‌های اولیه ایجاد و جابه‌جایی‌ها صفر گردید. سپس در مرحله دوم شمع‌ها به مدل اضافه شد.

براساس نتایج طراحی سیستم پایدارساز با توجه به ضوابط آیین‌نامه FHWA، میخ‌ها با طول ۰/۸ ارتفاع گود و زاویه ۱۵ درجه با قطر گودال ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. فاصله قرارگیری اولین میخ از سطح زمین ۱ متر و در ادامه فاصله قرارگیری میخ‌ها در هر دو جهت ۱/۵ متر است. رفتار میخ‌ها الاستیک فرض شده است. همچنین قطر میلگردها نیز در گودهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متری به ترتیب ۲۸، ۳۰، ۳۲ و ۳۴ میلی‌متر و ضخامت شاتکریت به صورت ثابت ۱۰ سانتی‌متر مدل‌سازی شده است [۱۲].

مشخصات سطح تماس بین شاتکریت- خاک و فونداسیون- خاک نیز به صورت ضریبی از مشخصات مقاومتی و سختی خاک، برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است [۱۸].

۲-۳- صحت‌سنجی

از دو پژوهش مطالعه در محل و تحقیق آزمایشگاهی که به صورت مناسبی نتایج را ارائه کرده‌اند، جهت صحت‌سنجی استفاده شده است. در مطالعه اول، یک پروژه واقعی، بررسی شده است [۶]. در این پروژه از سیستم ترکیبی نیل و انکراژ جهت پایدارسازی گود استفاده شده است. نیل‌ها در هفت ردیف و انکرها در سه



شکل ۴- (الف) مقطع عرضی مدل ساخته شده و (ب) مقایسه نتایج مدل سازی عددی و برداشت صحرائی [۱۰]

جدول ۵- متغیرهای در نظر گرفته شده در این پژوهش

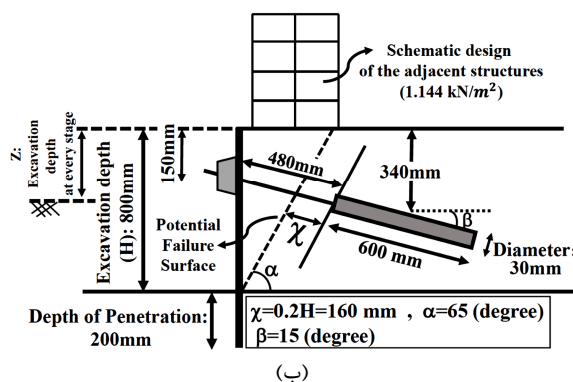
مقدار	واحد	مشخصات
خاک (لایه ۱، ۲ و ۳)		
۰/۸۵ و ۱۳/۷۵، ۰/۱۶	meter	ضخامت
۱۶۰ و ۲۵، ۱۰	kPa	چسبندگی
۳۵ و ۲۰، ۸	degree	زاویه اصطکاک داخلی
صفر، صفر و ۵	degree	زاویه اتساع
۲۶ و ۱۹/۶، ۱۸/۲	kN / m^3	وزن مخصوص
۲۰۰۰ و ۲۰، ۴	MPa	مدول ارتجاعی
۰/۲۵ و ۰/۳۵، ۰/۴۵	-	نسبت پواسون
میخ		
۱۵	درجه	زاویه استقرار
۶۰	degree	قطر چاله
۳۲	degree	قطر میلگرد
۱	meter	فاصله میخ‌ها در جهت افقی
۲۶ و ۱۹/۶، ۱۸/۲	kN / m^3	وزن مخصوص
۲۱۰	MPa	مدول ارتجاعی
۰/۲۸	-	نسبت پواسون
انکر		
۱۵	degree	زاویه استقرار
۷۵	millimeter	قطر چاله
۲۸	MPa	مدول ارتجاعی طول باند
۲۰۰	MPa	مدول ارتجاعی طول آنباند
۰/۲۸	-	نسبت پواسون طول باند
۰/۱۶	-	نسبت پواسون طول آنباند
شاتکریت		
۲۰۰	millimeter	ضخامت
۲۰۰	MPa	مدول ارتجاعی
۰/۲	-	نسبت پواسون

۶ مشخص شده است. همچنین نمای کلی و مقطع عرضی مدل آزمایشگاهی در شکل ۵ و مدل عددی ساخته شده در نرم افزار و مقایسه نتایج مطالعه آزمایشگاهی و مدل سازی عددی در شکل ۶ نشان داده شده است.

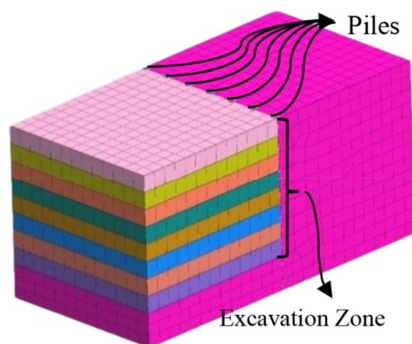
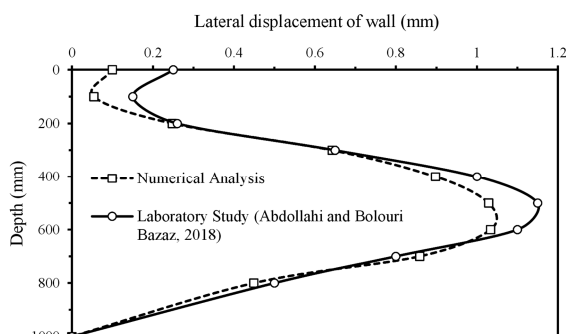
در مرحله سوم و چهارم به ترتیب دو لایه خاکبرداری به ضخامت ۱۰۰ میلی متر انجام شد. سپس انکرها نصب گردید و در مراحل بعد لایه های سوم تا هشتم، هر کدام به ضخامت ۱۰۰ میلی متر گودبرداری شد. مشخصات خاک و شمع استفاده شده در مدل، در جدول

جدول ۶- مشخصات مصالح

مقدار	واحد	مشخصات
خاک		
۲/۸۵۶	-	وزن مخصوص ویژه دانه های خاک
۱۵/۷۵	kN/m ³	وزن مخصوص خشک خاک
۴۰	degree	زاویه اصطکاک داخلی
شمع		
پلی پروپیلن	-	جنس
۶/۷	millimeter	ضخامت
۲۶/۶	millimeter	قطر داخلی
۴۰	millimeter	قطر خارجی
۱۰۰۰	millimeter	طول
۲	GPa	مدول الاستیسیته



شکل ۵- (الف) نمای واقعی و (ب) مقطع عرضی مدل آزمایشگاهی [۹]



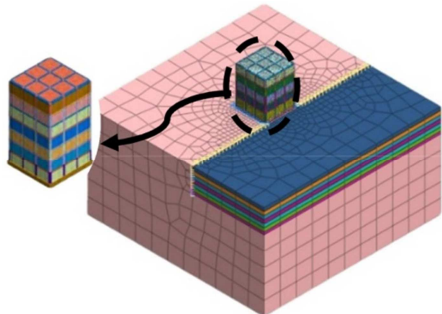
شکل ۶- (الف) مدل ساخته شده در نرم افزار جهت صحت سنجی و مقایسه نتایج مدل سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی [۹]

مدل سازی، از سه نوع المان یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی استفاده شده است. در بخش های صفحه ای مانند شاتریت

۴-۲- جزییات مدل سازی عددی

پس از صحت سنجی مدل رفتاری و در فرآیند

مجاور گود، پروفیل تغییرمکان جداره آن است. مطالعات نشان می‌دهد که پروفیل تغییرمکان جداره گود در انواع خاک‌های چسبنده و دانه‌ای متفاوت است [۱۹].



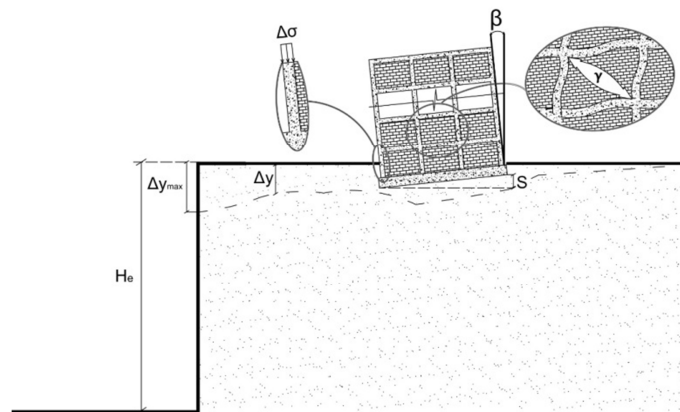
شکل ۷- نمای سه‌بعدی مدل ساخته شده در نرم‌افزار MIDAS GTS NX

بدین‌گونه که در خاک‌های دانه‌ای پروفیل تغییرمکان به شکل مقعر است؛ یعنی بیشترین تغییرمکان افقی در عمقی پایین‌تر از تاج و حداکثر نشست در محلی با فاصله از تاج رخ می‌دهد. در شکل ۸، متغیرها و نمادهای استفاده شده در ارائه نتایج به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.

از المان دوبعدی چهاروجهی با چهار گره استفاده شده است. همچنین در نواحی سه‌بعدی از المان‌های شش‌وجهی با هشت گره، پنج‌وجهی با پنج گره و چهاروجهی با چهار گره به‌صورت مرکب سوده برده شده است [۱۸]. در این پژوهش، روند مدل‌سازی و تحلیل بدین‌گونه است که پس از ساخت هندسه مدل و مش‌بندی، تنش‌های اولیه در شرایط بدون ساختمان اعمال و تغییرمکان‌ها در این مرحله صفر شده است. در مرحله بعد، بار ساختمان مجاور اعمال و تغییرمکان‌های ناشی از بارگذاری آن نیز صفر شده است. در ادامه، روند گودبرداری با برداشتن لایه اول، اضافه کردن میخ‌ها، شاتکریت و سطح تماس بین خاک و شاتکریت آغاز می‌شود. مراحل گودبرداری تا رسیدن به تراز کف گود ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۷ نمای سه‌بعدی مدل ساخته شده در نرم‌افزار نشان داده شده است.

۳- تفسیر نتایج

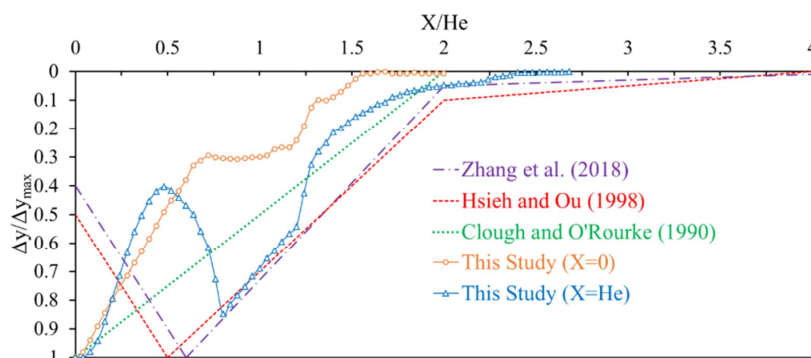
از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار بر پاسخ ساختمان



شکل ۸- متغیرها و نمادهای استفاده شده در ارائه نتایج

بیانگر نسبت فاصله از لبه گود به عمق آن است و محور عمودی نشان‌دهنده نسبت نشست در هر نقطه به حداکثر نشست ناشی از گودبرداری است. با توجه به شکل ۹، در نتایج پژوهش حاضر مشخص است که حداکثر نشست در لبه گود رخ می‌دهد که تطابق بهتری با نتایج ارائه شده توسط محققین در مرجع [۲۰] دارد.

پژوهشگران مختلف، پروفیل‌هایی جهت تخمین محل حداکثر نشست ارائه کرده‌اند [۲۰-۲۲]. شکل ۹ نشان‌دهنده نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر و نتایج محققین گذشته است. در شکل، نتایج برای شرایطی که ساختمان در لبه گود و با فاصله‌ای به اندازه عمق گود قرار گرفته باشد، نمایش داده شده است. محور افقی نمودار

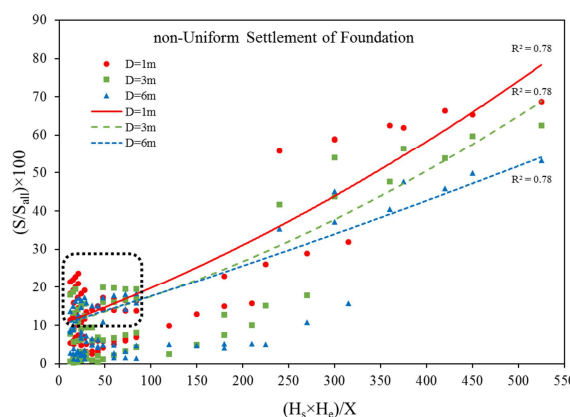


شکل ۹- مقایسه پروفیل نشست ناشی از گودبرداری به‌دست آمده از این تحقیق و پژوهش‌های قبل

چرخش ساختمان مجاور گود β ، دوران ترک‌خوردگی β_{all} ، اضافه تنش محوری $\Delta\sigma$ ، مقاومت فشاری تک محوری بتن f'_c ، کرنش برشی با γ و حد ترک‌خوردگی دیوارهای میانقابی با γ_{all} نشان داده شده است.

میزان نشست غیریکنواخت مجاز پی گسترده واقع بر خاک ماسه‌ای، ۲ سانتی‌متر و چرخش مجاز ساختمان و کرنش ترک‌خوردگی دیوارهای بنایی به ترتیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است [۲۴-۲۶].

نتایج نشست غیریکنواخت فونداسیون ساختمان‌های مجاور عملیات گودبرداری در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. محور عمودی نمودار نشان‌دهنده نسبت نشست غیریکنواخت به نشست غیریکنواخت مجاز است. خط‌های برازش داده شده در نمودار، بدون در نظرگیری نسبت نشست‌های غیریکنواخت زیر ۱۰ درصد است.



شکل ۱۰- نشست غیریکنواخت پی گسترده ساختمان مجاور گود

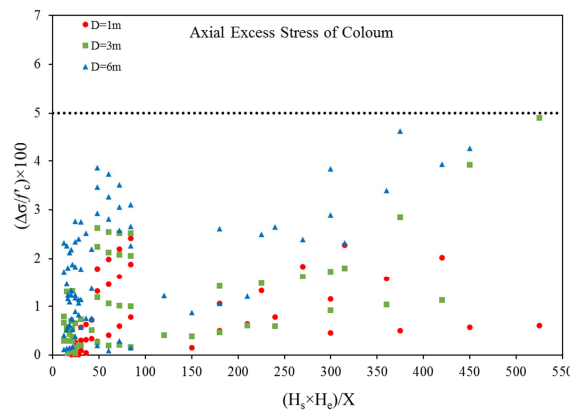
در شکل ۱۱ نتایج مربوط به چرخش ساختمان

با این حال نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، وجود سربار، مانند یک ساختمان در اطراف گود می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر روی پروفیل نشست ناشی از گودبرداری در محیط اطراف گود داشته باشد. همچنین براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مشخص است در فاصله‌ای به اندازه عمق گودبرداری از جداره گود، نشست زمین متفاوت از پروفیل‌های ارائه شده توسط سایر محققین رفتار می‌نماید. در شرایطی که ساختمان در لبه گود قرار گرفته است، نشست زمین در فاصله‌ای به اندازه عمق گود، اندکی بیشتر از نقاط نزدیک به خود است. همچنین در شرایطی که ساختمان در فاصله‌ای به اندازه عمق گود قرار گرفته است، زمین و ساختمان، نشست قابل‌توجهی در حدود ۶۵ درصد نشست حداکثر تجربه می‌کنند. نعیمی‌فر و همکاران، فاصله‌ای حدودی به اندازه طول میخ‌ها را از لبه گود پایدارشده به روش میخ‌کوبی، فاصله بحرانی می‌نامند. آن‌ها میزان حداکثر خرابی و تغییرشکل را در گودهای پایدارشده به روش میخ‌کوبی در فاصله بحرانی پیش‌بینی می‌کنند. در این پژوهش طول میخ‌ها ۰/۸ عمق گود در نظر گرفته شده است [۲۳]. پروفیل‌های به‌دست آمده از این پژوهش تا ناحیه‌ای که میزان نشست به صفر میل می‌کند، ادامه داده شده‌اند.

در ادامه نمودارهای به‌دست آمده از نتایج تحلیل‌های عددی نمایش داده می‌شود. محور افقی تمام نمودارها بیانگر نسبت حاصل‌ضرب ارتفاع ساختمان در عمق گود به فاصله ساختمان از گود است. در این تحقیق مطابق شکل ۸، نشست پی S ، نشست مجاز پی S_{all} ،

فاصله‌های نزدیک آن‌ها است. در این نمودارها همچنین مشخص است که با افزایش عمق گود و ارتفاع ساختمان و با کاهش فاصله ساختمان از لبه گود، نمودارها صعودی هستند. از سویی دیگر، با افزایش عمق استقرار پی که به معنای کاهش عمق گودبرداری زیر فونداسیون ساختمان است؛ مقدار نشست و دوران ساختمان کاهش پیدا می‌کند.

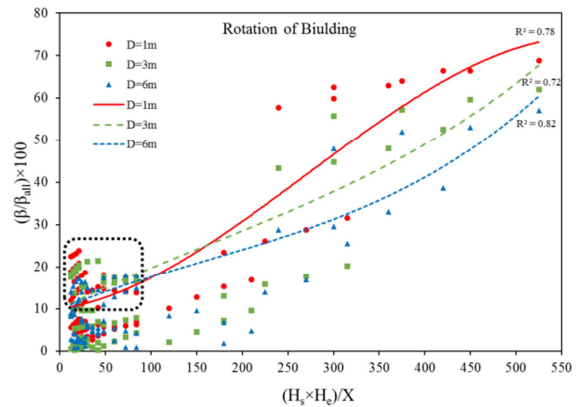
نمودار شکل ۱۲، بیانگر حداکثر اضافه تنش محوری ستون بتنی ساختمان‌های مجاور گودبرداری است. محور عمودی این نمودار نشان‌دهنده نسبت اضافه تنش ناشی از گودبرداری به مقاومت فشاری بتن است. در این تحقیق مقاومت فشاری تک محوری بتن ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در این نمودار، حداکثر نسبت افزایش تنش محوری در ستون به مقاومت فشاری بتن کمتر از ۵ درصد است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت آسیب‌سازهای به ساختمان بتنی وارد نمی‌شود.



شکل ۱۲- حداکثر اضافه تنش محوری ستون بتنی ساختمان مجاور گودبرداری

۱۳- ب، نتایج مربوط به میانقاب‌های داخلی نمایش داده شده است. براساس نتایج نمایش داده شده، حداکثر کرنش برشی در هر دو نوع میانقاب کمتر از ۱۵ درصد کرنش ترک‌خوردگی است. لازم به ذکر است در نمودارهای شکل ۱۲ و ۱۳ نتایج از رابطه خاصی پیروی نمی‌کنند.

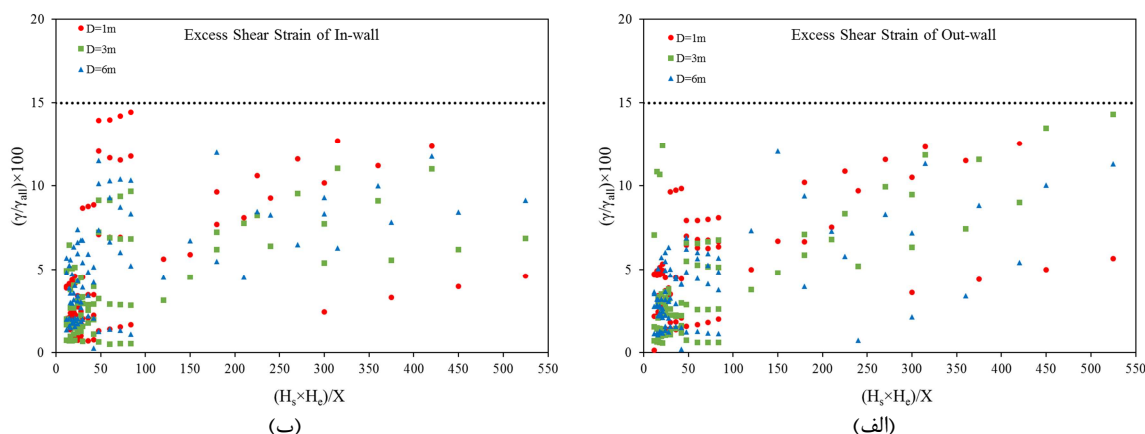
مجاور عملیات گودبرداری نمایش داده شده است. محور عمودی این نمودار نسبت چرخش ایجاد شده به مقدار دوران باعث ترک‌خوردگی دیوارها و جداکننده‌ها است.



شکل ۱۱- چرخش ساختمان مجاور عملیات گودبرداری

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بخشی از نتایج که با خط‌چین مشکی مشخص شده‌اند، نشان می‌دهند که نشست و چرخش ساختمان‌های قرار گرفته در فاصله‌ای به اندازه عمق گود از جداره گود، بعد از ساختمان‌های در لبه گود، بیشتر از ساختمان‌های مشابه قرار گرفته در

در شکل ۱۳، نتایج حداکثر اضافه کرنش برشی میانقاب‌های ساختمان مجاور گودبرداری نمایش داده شده است. محور عمودی این نمودارها نشان‌دهنده نسبت اضافه کرنش برشی میانقاب‌ها ناشی از گودبرداری به کرنش برشی ترک‌خوردگی دیوارهای مصالح بنایی است. در شکل ۱۳- الف، نتایج مربوط به میانقاب‌های خارجی و در شکل



شکل ۱۳- اضافه کرنش برشی دیوارهای میانقابی (الف) پیرامونی و (ب) داخلی ساختمان مجاور گودبرداری

۴- نتیجه‌گیری

گود، حاصل از عملیات گودبرداری کمتر از ۵ درصد مقاومت فشاری بتن است.

۵- میزان کرنش برشی در دیوارهای پیرامونی و داخلی ساختمان‌های مجاور عملیات گودبرداری که از جنس مصالح بنایی هستند، کمتر از ۱۵ درصد حد ترک‌خوردگی است. با این حال، با توجه به کرنش‌های برشی موجود در دیوارهای پیرامونی و داخلی ساختمان قبل از عملیات گودبرداری، میزان اضافه کرنش یاد شده می‌تواند باعث ترک‌خوردگی دیوار شود.

۶- نشست ناشی از گودبرداری تا فاصله حدوداً ۲ برابر عمق گود به صورت کاهشی ادامه دارد. بعد از فاصله یاد شده میزان نشست ناچیز می‌شود.

۷- عمق استقرار پی در ساختمان‌های مجاور گودبرداری اثر کاهشی بر روی نشست و چرخش ساختمان در اثر عملیات گودبرداری دارد. با افزایش عمق استقرار پی، نشست پی و چرخش ساختمان به دلیل کاهش عمق گودبرداری زیر پی ساختمان، کاهش می‌یابد.

با استفاده از نمودارهای ارائه شده در نتایج این پژوهش و در نظرگیری متغیرهای ساده‌ای چون عمق گود، ارتفاع ساختمان و فاصله ساختمان از لبه گود می‌توان نشست، چرخش، اضافه تنش محوری و کرنش برشی دیوارهای میانقابی ناشی از گودبرداری در ساختمان‌های اسکلت بتنی را به آسانی محاسبه کرد.

در این پژوهش با استفاده از تحلیل‌های عددی، به بررسی پاسخ ساختمان‌های اسکلت بتنی تحت اثر گودبرداری عمیق در مجاورت آن پرداخته شد. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش ارائه می‌گردد:

۱- در این پژوهش، نمودارهای نوینی جهت تخمین نشست غیریکنواخت پی، چرخش ساختمان، حداکثر اضافه تنش محوری ستون و حداکثر کرنش برشی در دیوارهای میانقابی داخلی و پیرامونی ساختمان‌های بتنی مجاور عملیات گودبرداری ارائه شد.

۲- وجود سربار در فاصله‌های مختلف از لبه گود می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی پروفیل نشست زمین بگذارد. پیش‌بینی می‌شود میزان نشست در ساختمان‌های با فاصله از جداره گود، نزدیک به نشست نقاط نزدیک به جداره گود باشد.

۳- نشست زمین در فاصله‌ای به اندازه عمق گود از جداره آن، بیشتر از نقاط نزدیک‌تر به لبه گود و دورتر از آن است.

۴- در صورتی که واژگونی ساختمان در اثر لغزش جداره گود مجاور ساختمان اتفاق نیافتد، اضافه تنش محوری ستون‌های بتنی ساختمان مجاور

مراجع

- [1] Hsiung, B. (2009). "A Case Study on the Behaviour of a Deep Excavation in Sand", *Computers and Geotechnics*, 36(4), 665-675.
- [2] Pak, A., Maleki, J., Aghakhani, N., & Yousefi, M. (2019). "Numerical Investigation of Stability of Deep Excavations Supported by Soil-Nailing Method", *Geomechanics and Geoengineering*, 1-18.
- [3] Finno, R., & Bryson, L. (2002). "Response of Building Adjacent to Stiff Excavation Support System in Soft Clay", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 16(1), 10-20.
- [4] Halim, D., & Wong, K. (2012). "Prediction of Frame Structure Damage Resulting From Deep Excavation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(12), 1530-1536.
- [5] Tan, Y., Huang, R., Kang, Z., & Bin, W. (2016). "Covered Semi-Top-Down Excavation of Subway Station Surrounded by Closely Spaced Buildings in Downtown Shanghai: Building Response", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(6), 04016040.
- [6] Wang, H., Cheng, J.-h., Guo, Y.-c., & Gao, X.-j. (2016). "Failure Mechanism of Soil Nail—Prestressed Anchor Composite Retaining Structure", *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(6), 1889-1898.
- [7] Laefer, D., Ceribasi, S., H. Long, J., & J. Cording, E. (2009). "Predicting RC Frame Response to Excavation-Induced Settlement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), 1605-1619.
- [8] Seok, J., Kim, O., Chung, C., & Kim, M. (2001). "Evaluation of Ground and Building Settlement Near Braced Excavation Sites by Model Testing", *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1127-1133.
- [9] Abdollahi, M., & Bolouri Bazaz, J. (2018). "Experimental Study of the Excavation Using Pile-Anchorage System", *Journal of Civil Engineering Office, Ferdowsi University of Mashhad*, 31(4), 79-96.
- [10] Bryson, L., & Kotheimer, M. (2011). "Cracking in Walls of a Building Adjacent to a Deep Excavation", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(6), 491-503.
- [11] Dong, Y. (2014). *Advanced Finite Element Analysis of Deep Excavation Case Histories*. PhD Thesis, University of Oxford.
- [12] Lazarte, C., Elias, V., Espinoza, R., & Sabatini, P. (2003). *Soil Nail Walls, Geotechnical Engineering Circular No. 7*. Report No FWHA0-IF-03-017.
- [13] Mair, R. (1978). *Centrifugal Modelling of Tunnel Construction in Soft Clay*. PhD Thesis, University of Cambridge.
- [14] Ghanbari, A. (2009). "Study of Elastic Modulus of Alluvium Deposits in Southern Tehran", *Journal of Geoscience*, 18(71), 3-8.
- [15] Maatkamp, T. (2016). *The Capabilities of the Plaxis Shotcrete Material Model for Designing Laterally Loaded Reinforced Concrete Structures in the Subsurface*, Master Thesis, T. U. Delft.
- [16] Karimi, A., Karimi, M., Kheyroddin, A., & Amirshahkarami, A. (2017). "Nonlinear Modeling of Unreinforced Masonry Wall Under in-Plane Load and Investigation of the Effect of Various Parameters", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(4), 21-34.
- [17] Loli, M., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Cattari, S., Degli Abbatì, S., & Lagomarsino, S. (2012). "Response of Historic Masonry Structures to Tectonic Ground Displacements", *In Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 24-28.
- [18] MIDAS, I. (n.d.). MIDAS GTS NX Analysis reference. MIDAS Information Technology Co., Ltd.
- [19] Ou, C. Y., Hsieh, P. G., & Chiou, D. C. (1993). "Characteristics of Ground Surface Settlement During Excavation", *Canadian Geotechnical Journal*, 30(5), 758-767.
- [20] Clough, G. W. (1990). "Construction induced movements of in situ walls", *Design and performance of earth retaining structures*, 439-470.
- [21] Hsieh, P.-G., & Ou, C.-Y. (1998). "Shape of Ground Surface Settlement Profiles Caused by Excavation", *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), 1004-1017.
- [22] Zhang, Y.-Q., Wang, J.-H., & Li, M.-G. (2018). "Effect of Dewatering in a Confined Aquifer on Ground Settlement in Deep Excavations", *International Journal of Geomechanics*, 18(10), 04018120.
- [23] Naeimifar, I., Yasrobi, S., & Fakher, A. (2016). "Allowable Limit of Soil Nail Wall Deflection Based on Damage Level of Adjacent Structures", *Modares Civil Engineering Journal*, 16(2), 257-271.
- [24] Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
- [25] Bjerrum, L. (1963). "Discussion on Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering vol III", *Norwegian Geotechnical Institute Publ*, 98, 1-3.
- [26] Boone, S. (1996). "Ground Movement Related Building Damage", *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(11), 886-896.