

بررسی تأثیر اندرکنش گودبرداری و سازه‌ی مجاور آن در تحلیل گودبرداری‌ها در محیط‌های شهری*

محمد ملکی^(۱)بهادر بائی^(۲)محسن بیٹی^(۳)

چکیده یکی از مسائل مهم در گودبرداری در محیط‌های شهری تأثیر آن بر ساختمان مجاور است که بعضاً منجر به خسارت جانی و مالی جبران ناپذیری می‌گردد. در این خصوص، تأثیر سختی سازه ساختمان مجاور در کنترل تغییر مکان زمین ناشی از گودبرداری نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از نرم افزارهای اجزاء محدود *PLAXIS* و *SAP* و با به کارگیری یک مدل رفتاری ارتجاعی خمیری با سخت شونده‌گی برای مصالح زمین، اندرکنش گودبرداری و سازه‌ی مجاور آن، مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی تأثیر سختی سازه مجاور با در نظر گیری دو سیستم گودبرداری متفاوت، با دو مدل برای سازه‌ی مجاور مورد مطالعه قرار گرفت. اولین سیستم سازه مجاور یک قاب خمشی بتن آرمه است که سختی آن در مراحل مختلف گودبرداری در تحلیل لحاظ می‌گردد. در دومین سیستم، سازه‌ی مجاور با یک تیر ارتجاعی معادل سازی شده است. نتایج حاصله نشان دهنده‌ی تأثیر قابل ملاحظه‌ی سختی سازه مجاور در کنترل تغییر مکان زمین ناشی از گود برداری و تأثیر گودبرداری بر نیروهای داخلی اعضاء سازه است. استفاده از روش معادل سازی سازه با یک تیر ارتجاعی که متضمن سادگی و انعطاف پذیری در نظرگیری سختی‌های مختلف برای یک وزن ساختمان داده شده است، می‌تواند قابل کاربرد جهت محاسبه‌ی اندرکنش گودبرداری- سازه مجاور باشد.

واژه‌های کلیدی تحلیل عددی، گودبرداری، سازه‌ی مجاور، اندرکنش گودبرداری- سازه‌ی مجاور، نشست سطحی زمین.

Excavation-Adjacent Structure Interaction Effect on Excavation Analysis in Urban Area

M. Maleki

B. Baei

M. Beiti

Abstract Excavation in urban plans influences the adjacent buildings and sometimes creates the irreparable damages. In this regard the effect of adjacent structure stiffness on the ground movement due to excavation is important. However, there are only a few studies in this area of research. In this paper, the interaction of excavation and its adjacent structure is studied using two famous finite elements codes (*PLAXIS* & *SAP*) and an elastoplastic constitutive model. For this purpose, the two excavation systems have been considered. The adjacent structure in the first system is a concrete bending frame. In the second system, instead of a real structure, an equivalent (in stiffness) elastic beam has been used. The achieved results indicate the considerable effect of adjacent structure on the ground movement due to excavation. In addition, the remarkable influence of excavation on internal forces of different members of structure is addressed. It is shown that the application of an equivalent elastic beam, which has the characteristic of simplicity and flexibility in consideration of different stiffness for a given building weight, can be used for evaluation of the interaction of excavation and its adjacent structure.

Key Words Numerical Analysis, Excavation, Excavation and Adjacent Structure Interaction, Ground Surface Settlement.

* تاریخ تصویب مقاله ۸۸/۹/۸ و تاریخ دریافت نسخه‌ی نهایی اصلاح شده ۸۹/۶/۲۹

- (۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا
- (۲) کارشناسی ارشد، گرایش مکانیک خاک و پی، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه بوعلی سینا
- (۳) کارشناسی ارشد، گرایش مکانیک خاک و پی، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه بوعلی سینا

مقدمه

ایجاد گودبرداری با اعماق مختلف جهت احداث ساختمان‌های بلند و بناهای مهم، امری اجتناب ناپذیر است. این موضوع در مناطق شهری و به خصوص در مراکز آن‌ها با عنایت به وجود ساختمان‌ها و تأسیسات در اطراف محل گود برداری از اهمیت زیادی برخوردار است. عدم دقت در طرح و محاسبه و اجرای گودبرداری‌ها در این مناطق، ممکن است منجر به خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری گردد. کاربرد نرم افزارهای اجزاء محدود، علیرغم امکانات و تسهیلات فوق العاده ای که در تحلیل گودبرداری‌ها در اختیار گذاشته است، بدون شناخت از ویژگی‌ها و عوامل مؤثر در رفتار سیستم گودبرداری، ممکن است نتایج گمراه کننده و نامناسبی را ارائه دهد. یکی از این عوامل، نحوه مدل کردن سازه‌های مجاور محل گودبرداری است که بستگی به وزن، هندسه و سختی سازه‌ی مجاور دارد. مطالعات نسبتاً زیادی از طرف محققین در این زمینه، چه به صورت تجربی و چه به صورت عددی، انجام گرفته است. کلاف (Clough) و همکاران [1]، با انجام یک مجموعه مطالعات تجربی، شامل برداشت‌های محلی از حفاری‌های انجام شده در خاک‌های مختلف تخمینی از پروفیل نشست سطح زمین ناشی از گودبرداری برای خاک‌های رسی و ماسه ای ارائه دادند. سئوک (Seok) و همکاران [2]، با ایجاد یک مدل آزمایشی، نشست ساختمان مجاور ناشی از گودبرداری مهاربندی شده را مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اگر ساختمان مجاور گود در عمقی از سطح زمین باشد، میزان حرکت زمین بستگی به مقدار این عمق خواهد داشت. در واقع، وقتی عمق مدفون شدگی ساختمان زیاد باشد، نشست زمین زیر ساختمان کاهش خواهد یافت؛ به طوری که اگر این عمق در حدود بیش از نصف ارتفاع گودبرداری باشد، این نشست، ناچیز خواهد شد.

او (Ou) و همکاران [3] براساس ۱۰ مطالعه‌ی

محلی در تایپه (مرکز تایوان) برای توزیع نشست‌های محدب و قاشقی، منحنی‌هایی پیشنهاد کردند. بوسکاردین (Boscardin) [4]، با مدل کردن سازه به صورت یک تیر عمیق، جواب سازه را نسبت به حفاری تونل بررسی کردند. آن‌ها براساس مشخصات تغییر شکل تیر عمیق چون کرنش افقی، و تغییرات شیب در طول تیر معیارهای کیفی را برای برآورد میزان آسیب دیدگی ساختمان ناشی از حفر تونل ارائه کردند. و بالاخره به عنوان آخرین اشاره به کارهای انجام شده در ادبیات، می‌توان به کارهای فینو (Finno) و همکاران [5] اشاره کرد که به تأثیر گودبرداری بر سازه‌های مجاور در پروژه بازسازی زیرگذرها در ایالت شیکاگو مربوط می‌شود.

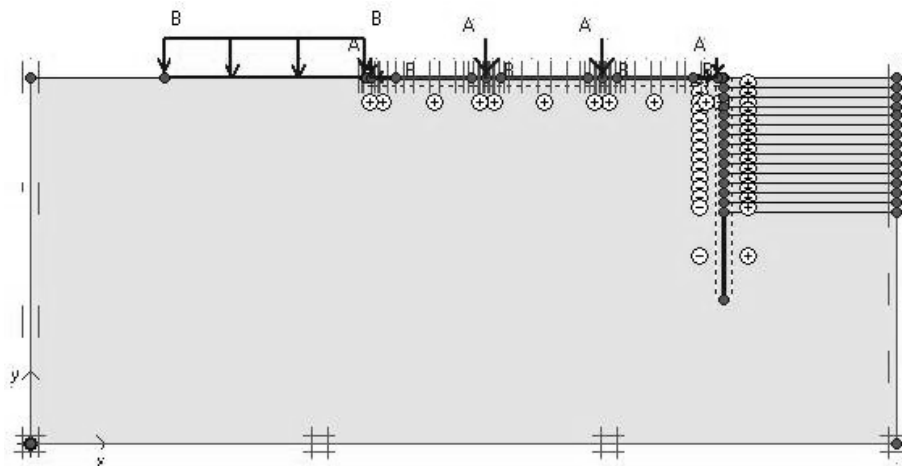
تأثیر وزن ساختمان مجاور در محاسبات کلاسیک و اجزاء محدود، به عنوان پدیده‌ای کاملاً مشخص در ادبیات مهندسی وارد شده و اصولاً با اضافه شدن وزن میزان تغییر مکان‌ها افزایش و ضریب اطمینان پایداری کاهش می‌یابد. هندسه‌ی سازه از نظر ابعاد در پلان و فاصله‌ی آن از دیواره‌ی گودبرداری می‌تواند نقشی مهمی در میزان تغییر مکان‌های محیط بازی کند. اصولاً یک تحلیل سه بعدی می‌تواند تأثیر هندسه را به خوبی اعمال کند. تأثیر سختی سازه‌ی مجاور، کمتر مورد مطالعه واقع گردیده است و در محاسبات کلاسیک و اجزاء محدود، غالباً وزن ساختمان به صورت یک سربار معادل در سطحی انعطاف پذیر، اعمال می‌شود. به نظر می‌رسد، از یک طرف سختی سازه مجاور نقش قابل توجهی در کنترل تغییر مکان در دیواره گود و سطح زمین داشته باشد و از طرف دیگر گودبرداری باعث تغییر در نیروهای داخلی اعضاء سازه گردد؛ لذا در مطالعه حاضر به بررسی این موضوع پرداخته شده است. بدین منظور، یک مجموعه تحلیل اجزاء محدود دو بعدی (کرنش مسطح) انجام گرفت. مدل رفتاری برای خاک از نوع ارتجاعی-خمیری با سخت شونده‌گی غیر خطی همسان و برای سازه‌ی ارتجاعی خطی لحاظ شده است. دو سیستم گودبرداری با هندسه، مصالح و سازه نگهبان مختلف در

معرفی مدل هندسی برای گودبرداری با سازه مجاور واقعی

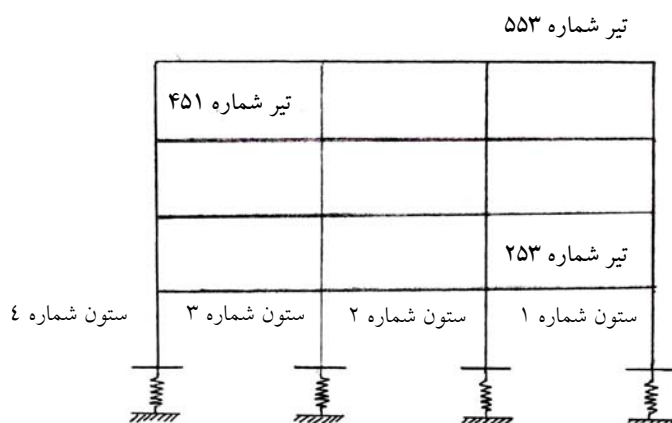
یک سیستم دوبعدی با عرض گود ۱۸ متر در محیطی ماسه‌ای با سازه نگهبان از نوع سپر بتنی طره‌ای به ضخامت ۵۰ سانتی متر مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است. این سیستم، متأثر از یک ساختمان چهار طبقه اسکلت بتنی با قاب خمشی در مجاورت گود قرار دارد. هندسه قاب خمشی مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است. بار این ساختمان توسط یک مجموعه شالوده نواری در امتداد گودبرداری (عمود بر صفحه) به عرض ۱۵۰ سانتی متر و ضخامت ۷۰ سانتی متر به زمین منتقل می‌شود. این شالوده‌ها توسط کلاف‌هایی به هم متصل گردیده‌اند. با توجه به آن‌که کد اجزاء محدود Plaxis مورد استفاده، دو بعدی و محاسبات از نوع کرنش مسطح است، لذا کلاف‌ها به یک سیستم دال با سختی معادل روی شالوده‌های نواری به ضخامت ۲۵ سانتی متر تبدیل شده‌اند. در امتداد عمود بر صفحه، فاصله ی قاب‌ها ۵/۵ متر در نظر گرفته شده که برای تحلیل کرنش مسطح جهت انتقال نتایج به کد Plaxis، بارگذاری حاصل از سازه در پای ستون‌ها که شامل بارهای محوری و برشی است، بر این عدد تقسیم می‌شوند.

نظر گرفته شد. در سیستم اول سازه مجاور، عبارت از یک قاب خمشی بتن آرمه با هندسه و بارگذاری واقعی است؛ در صورتی که در سیستم دوم، سازه ی مجاور با یک تیر عمیق، معادل شده است. با توجه به آن که نرم افزارهای قدرتمند موجود در مهندسی ژئوتکنیک امکان مدل کردن سازه با جزئیات آن را ندارند، لذا برای سیستم اول از دو نرم افزار اجزاء محدود SAP و PLAXIS استفاده شد. برای سیستم دوم با توجه به معادل سازی صورت گرفته برای سازه، صرفاً از نرم افزار PLAXIS استفاده گردیده است. پارامترهای مدل رفتاری خاک با استفاده از نتایج آزمایش‌های موجود برای دو نوع ماسه تعیین شدند. این مقاله شامل بخش‌های زیر است:

- الف- معرفی مدل هندسی سیستم گودبرداری با سازه ی مجاور واقعی،
- ب- تعیین پارامترهای مدل‌های رفتاری،
- پ- تحلیل و ارائه نتایج برای گودبرداری با سازه مجاور واقعی،
- ت - تحلیل و ارائه ی نتایج سیستم گودبرداری با در نظرگیری سازه مجاور به صورت تیر عمیق،
- ث- نتیجه گیری.



شکل ۱ مدل هندسی سیستم گودبرداری با در نظر گیری سازه‌ی مجاور به صورت واقعی



شکل ۲. هندسه قاب خمشی که در آن مقطع ستون‌ها $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ و مقطع تیرها $30\text{cm} \times 40\text{cm}$ در نظر گرفته شده است

کیلو پاسکال) را نشان می‌دهد و شکل (۵) نشان دهنده تغییرات کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری متناسب با منحنی‌های شکل (۴) می‌باشد. مقادیر پارامترهای حاصله در جدول (۱) داده شده‌اند. برای سیستم سپر و پی مدل رفتاری از نوع ارتجاعی خطی همسان در نظر گرفته شد که مقادیر پارامترها عبارتند از: $E_c = 25000\text{MPa}$ و $\nu = 0.15$.

تحلیل و ارائه نتایج برای گودبرداری با سازه مجاور واقعی

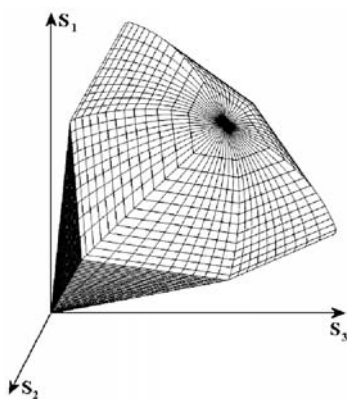
با عنایت به آن که در کد PLAXIS امکان تحلیل مجموعه‌ی گودبرداری و قاب خمشی مقدور نیست، لذا کد SAP به عنوان برنامه کمکی مورد استفاده قرار گرفت. مراحل تحلیل بدین ترتیب است که ابتدا سازه با استفاده از برنامه‌ی SAP تحت بارگذاری سرویس، تحلیل می‌گردد و مقدار بار هر یک از ستون‌ها روی شالوده قرائت می‌گردد. مقادیر بارهای فوق به مدل اجزاء محدود PLAXIS اعمال می‌شود. عملیات گودبرداری با برداشت لایه‌های ۵۰ سانتی‌متری خاک در تحلیل اجزاء محدود، مدل شده است. برای برداشت هر لایه‌ی ۵۰ سانتی‌متری یک بار تحلیل صورت می‌گیرد. ناشی از این تحلیل تغییر مکان‌هایی در زیر نقاط بارگذاری حاصل می‌شود. با اعمال این تغییر مکان‌ها به سازه و تحلیل با برنامه

تعیین پارامترهای مدل‌های رفتاری

مدل رفتاری برای محیط زمین که از جنس ماسه و به صورت همگن در نظر گرفته شده است، از نوع ارتجاعی خمیری غیرخطی با سخت شونده‌گی همسان است. این مدل از مجموعه مدل‌های موجود در نرم افزار PLAXIS است که در واقع توسعه مدل مور کلمب در دو جهت می‌باشد: اول، ایجاد یک سطح کلاهکی برای مدل کردن رفتار خمیری خاک‌ها در بارگذاری‌های همسان و نزدیک به آن و دوم در نظرگیری رفتار غیرخطی ارتجاعی خمیری قبل از خرابی، با اعمال یک مکانیزم سخت شونده‌گی همسان [6]. در شکل (۳) شمائی از سطوح تسلیم مدل در فضای تنش‌های اصلی نشان داده شده است. در این تحقیق، نتایج آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده مربوط به دو نوع ماسه‌ی متراکم مورد استفاده قرار گرفت [7]. با استفاده از این نتایج، با انجام سعی و خطا برای حصول بهترین انطباق بین منحنی‌های آزمایشگاهی و شبیه سازی مقادیر پارامترهای مدل، تعیین گردیدند. نمونه‌ای از نتایج شبیه سازی آزمایش‌ها در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده که در این تحقیق به عنوان خاک شماره‌ی ۱ معرفی شده است. شبیه سازی نتایج آزمایش‌ها برای خاک ۲ در [۸] آمده است. شکل (۴) منحنی‌های تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری در تنش‌های محصورکننده مختلف (۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰

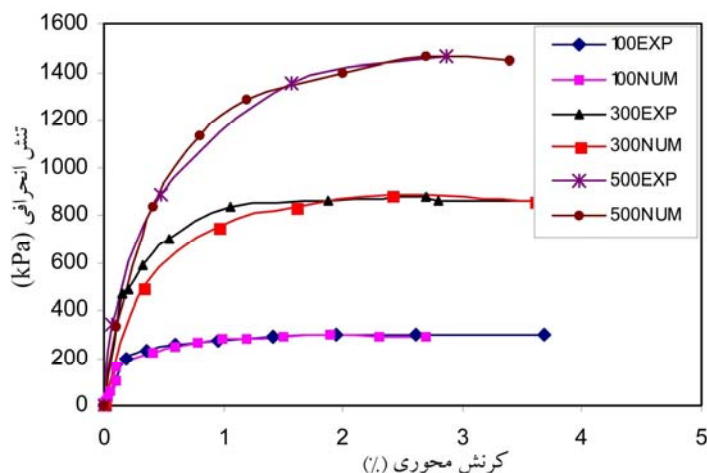
گودبرداری در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق گودبرداری تأثیر سختی هم بیشتر می‌گردد و میزان تغییر مکان کاهش می‌یابد.

مطابق شکل (۷) برای خاک شماره ۲ هم نتیجه مشابه حاصل شده، با این تفاوت که به علت بیشتر بودن پارامتر m که بیان‌کننده شدت تغییرات سختی خاک به وضعیت تنش است، عمق خاک برداری بیشتر به دست آمده است. در ارتباط با قسمت دوم، می‌توان گفت به همان اندازه که سختی ساختمان مجاور اثر مثبتی در کاهش میزان تغییر مکان‌های ناشی از گودبرداری دارد، خود سازه هم در حین و بعد از عملیات حفاری تحت تأثیر گودبرداری است. ایجاد تغییر مکان‌های نامتقارن زیر شالوده سازه مجاور، باعث تغییر در نیروهای داخلی اعضاء می‌گردد. به عنوان نمونه، تغییر در لنگر خمشی و نیروی برشی در تیر طبقه اول نزدیک به گود تیر شماره ۲۵۳ در شکل (۲)، بستگی به ارتفاع گودبرداری، در اشکال (۸) و (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، برای عمق ۵ متر، مقدار لنگر منفی در این تیر از مقدار $207/59$ به مقدار $299/24$ کیلونیوتون متر می‌رسد؛ یعنی افزایشی معادل $44/15$ درصد که ممکن است باعث لطمات جزئی یا خرابی عضو گردد. همچنین نیروی برشی در این تیر مطابق شکل (۹) از مقدار $204/82$ به مقدار 235 کیلونیوتون می‌رسد که افزایشی معادل $14/73$ درصد را نشان می‌دهد.

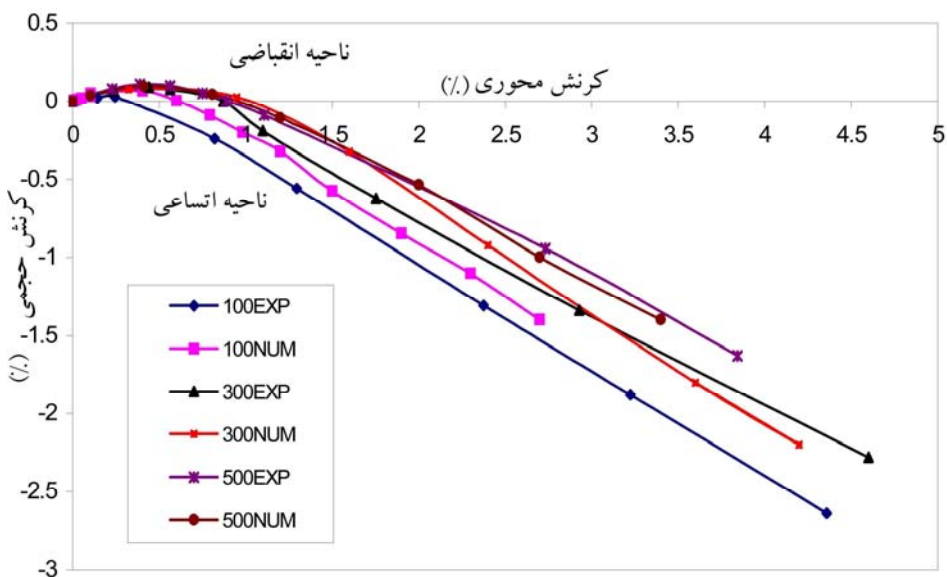


شکل ۳ سطح تسلیم مدل رفتاری مورد استفاده در این تحقیق

SAP نیروهای داخلی جدید در المان‌های سازه از جمله در محل تکیه‌گاه‌ها روی پی به دست می‌آید که قطعاً با مقادیر اولیه، متفاوت می‌باشند؛ به خصوص برای ستون‌های نزدیک به گود، این تفاوت بیشتر است. با داشتن این مجموعه بارهای جدید دومین لایه ۵۰ سانتی متری خاک برداشته می‌شود که منجر به تغییر مکان‌هایی در پای ستون‌ها می‌گردد و متعاقب آن برنامه PLAXIS وارد عمل می‌شود. عملیات فوق با برداشت لایه‌های متوالی تا مرحله‌ی خرابی ادامه داده می‌شود. تأکید می‌شود که در هر بار تحلیل با PLAXIS نیروهای مؤثر از سازه به سیستم گود، جدید است. میزان تغییر در نیروهای المان‌های سازه بستگی به هندسه و سختی سازه دارد؛ بدین ترتیب، تأثیر سختی سازه در میدان تغییر مکان زمین ناشی از گودبرداری لحاظ می‌شود. همان‌گونه که در مدل اجزاء محدود شکل (۱) دیده می‌شود و با توجه به آن‌که خاک ماسه‌ای و بدون چسبندگی است، سرباری ناچیز با میزان ۱۲ کیلونیوتن بر متر مربع در محدوده چپ سازه با هدف جلوگیری از مشکل عددی اعمال شده است. در کلیه‌ی تحلیل‌ها در فصل مشترک خاک با پی از المان ویژه‌ی فصل مشترک استفاده شده است. در PLAXIS مدل کردن فصل مشترک با اعمال ضرایب کاهش دهنده روی مشخصات مکانیکی مصالح صورت می‌گیرد. در این تحقیق ضریب کاهش دهنده اصطکاک از $0/6$ تا $0/75$ متغیر، در نظر گرفته شده است. در مقابل تحلیل‌های فوق، یک مجموعه تحلیل دیگر بدون تأثیر سختی سازه مجاور انجام گرفت. در این خصوص بارهای وارده در پای ستون‌ها به شالوده (حاصل از اولین تحلیل با برنامه SAP) تا انتهای عملیات گودبرداری ثابت می‌ماند. نتایج حاصل از این دو مجموعه تحلیل را می‌توان در دو قسمت، شامل بررسی اثر سازه‌ی مجاور روی تغییر مکان‌های ایجاد شده در زمین و بررسی اثر گودبرداری روی سیستم سازه‌ی ساختمان مجاور ارائه داد. در خصوص قسمت اول تغییر مکان نقطه‌ی A، پای ستون مجاور گود مطابق شکل (۱) در دو حالت با و بدون در نظر گیری سختی سازه مجاور نسبت به عمق



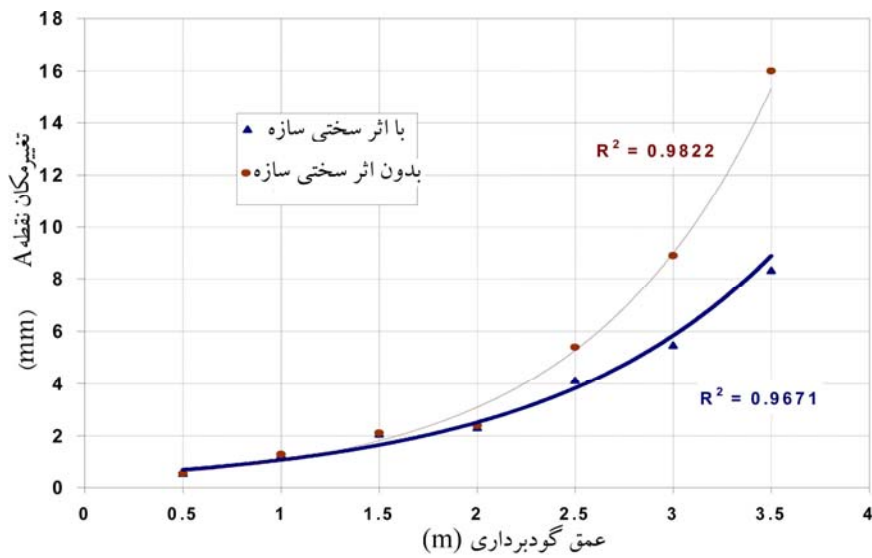
شکل ۴ شبیه سازی آزمایش های سه محوری زه کشی شده برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری (نتایج تجربی از مرجع [7] گرفته شده است)



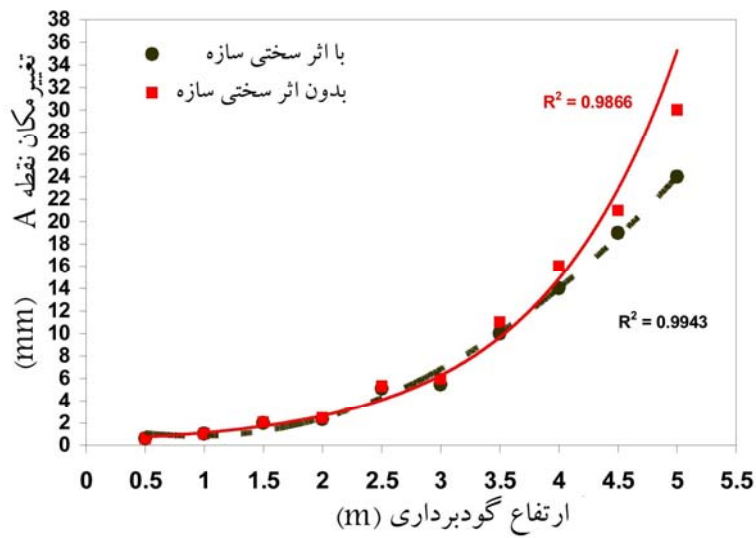
شکل ۵ شبیه سازی آزمایش سه محوری زه کشی شده برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری (نتایج تجربی از مرجع [7] گرفته شده است)

جدول ۱ پارامترهای مدل رفتاری خاک

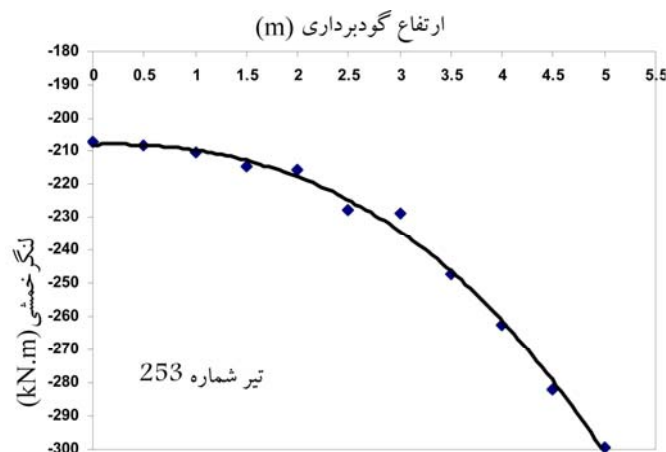
v_{ur}	ψ ($^{\circ}$)	ϕ' ($^{\circ}$)	c' (kPa)	m	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	γ_d (kN/m^3)	نوع خاک
۰/۲	۱۳	۳۶	۱	۰/۵۵	۱۱۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۹۰۰۰۰	۱۶/۰	(۱)
۰/۲۲	۱۳/۵	۳۸/۵	۱	۰/۸	۹۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۷۰۰۰۰	۱۵/۰	(۲)



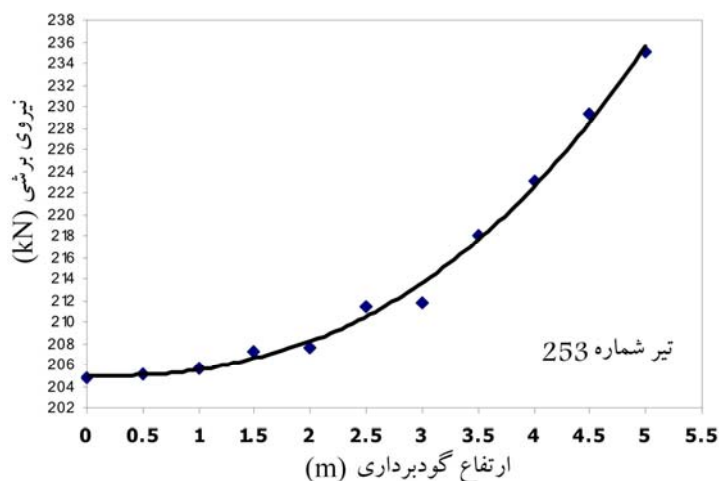
شکل ۶ تغییر مکان نقطه A (شکل (۱)) نسبت به عمق در دو حالت بدون و با در نظرگیری سختی سازه برای خاک شماره ۱



شکل ۷ تغییر مکان نقطه A نسبت به عمق در دو حالت بدون و با در نظرگیری سختی سازه برای خاک شماره ۲



شکل ۸ تأثیر گودبرداری بر لنگر خمشی در تیر ۲۵۳ برای خاک شماره ۲



شکل ۹ تأثیر گودبرداری بر نیروی برشی در تیر ۲۵۳ برای خاک شماره ۲

همیشه امکان پذیر نیست. با مدل کردن سازه‌ی مجاور با یک تیر ارتجاعی معادل، به طور نسبتاً ساده‌ای امکان تعریف واقع بینانه از سختی ساختمان را می‌توان فراهم ساخت. این نوع مدل کردن ساختمان، توسط پاتس (Potts) و آدنبروک (Adenbrooke) [9] برای مدل سازی اندرکنش تونل - خاک - سازه‌ی مجاور، مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، می‌توان دو سختی خمشی EI و محوری EA را تعریف کرد که در آن، E مدول ارتجاعی مصالح سازه‌ای و I ممان اینرسی و A

تحلیل و ارائه‌ی نتایج سیستم گودبرداری با در نظرگیری سازه‌ی مجاور به صورت تیر ارتجاعی معادل

گرچه مدل کردن سازه مجاور از طریق تعریف جزئیات هندسه و بارگذاری سازه، همان گونه که در قسمت قبل انجام گرفت، صحیح‌ترین روند محاسبه اندرکنش گودبرداری و سازه مجاور است و منجر به نتایج مطلوبی می‌شود، اما انجام چنین عملیاتی مستلزم داشتن اطلاعات مربوط به جزئیات سازه‌ی، هندسه و بارگذاری است که

$$t_{fe} = \sqrt{\frac{12(E_c I)_{struct}}{(E_c A)_{struct}}} \quad (4)$$

برای کرنش صفحه‌ای، L برابر واحد است و خصوصیات المان‌های تیر از روابط زیر به دست می‌آید:

$$E_{fe} = \frac{(E_c A)_{struct}}{t_{fe}}, \quad A_{fe} = t_{fe}, \quad I_{fe} = \frac{t_{fe}^3}{12} \quad (5)$$

به منظور بررسی کاربرد مدل تیر ارتجاعی، یک مجموعه تحلیل انجام گرفت. مدل هندسی اجزاء محدود به گونه‌ای انتخاب شده است که در آن عرض ساختمان مجاور ۳۰ متر، فاصله‌ی ساختمان از بر گودبرداری معادل ۱/۰ متر، عمق گودبرداری ۱۰ متر، عمق سنگ بستر ۴۰ متر، عرض گودبرداری ۲۰ متر، عرض کل مدل ۱۵۰ متر، مدفون شدگی سپر ۲/۵ متر، فاصله‌ی مهار تا سطح زمین ۲/۵ متر، خاک شماره ۱ با مقادیر پارامترها مطابق جدول (۲) مصالح سازه‌ای طبق جدول (۳) و مشخصات سختی و وزن ساختمان همسایه مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در جدول (۲) دیده می‌شود، مشخصات سختی خاک نسبت به عمق در دو لایه در نظر گرفته شده است. این موضوع به علت وابستگی سختی خاک به وضعیت تنش و این‌که در اعماق پائین تر مقادیر تنش‌های اولیه بیشتر است. ضمن آن که در نظر گرفتن چنین ملاحظه‌ای در بیان واقع بینانه پروفیل نشست سطح زمین ناشی از گودبرداری مؤثر خواهد بود [10]. برای اطلاع از جزئیات بیشتر مدل سازی اجزاء محدود به مرجع [۱۱] مراجعه شود.

در اشکال (۱۱) و (۱۴) (برای سربارهای بدون سختی) با افزایش شدت بارگذاری از ۱۰ تا ۵۰ کیلو پاسکال، حداکثر ۳۰ درصد به نشست سطح زمین و نیروی ایجاد شده در مهارها و ۲۰ درصد به انحراف افقی میانه دیوار افزوده شده است، ولی ناحیه ی حداکثر تغییر

سطح مقطع سازه است. مطابق شکل (۱۰) اگر ساختمان را متشکل از m طبقه در نظر بگیریم، در این صورت $m+1$ سقف (با احتساب یک دال معادل برای شالوده) خواهیم داشت. طبق قضیه‌ی محورهای موازی، سختی خمشی تیر عمیق از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

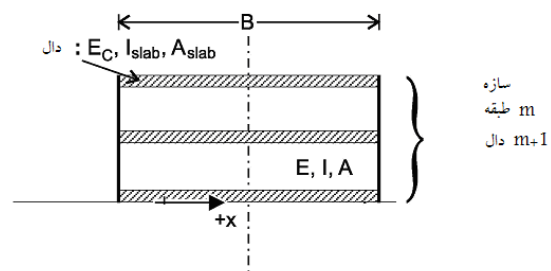
$$(E_c I)_{struct} = E_c \sum_1^{m+1} (I_{slab} + A_{slab} h_m^2) \quad (1)$$

که در آن h_m فاصله قائم محور تار خنثی تا دال m است و:

$$I_{slab} = \frac{t_{slab}^3 L}{12}, \quad A_{slab} = t_{slab} L$$

همچنین سختی محوری عبارت خواهد بود از:

$$(E_c A)_{struct} = (m+1)(E_c A)_{slab} \quad (2)$$



شکل ۱۰ مدل ساختمان مجاور

برای المان تیر مورد استفاده در تحلیل اجزاء محدود کرنش مسطح مدول یانگ E_{fe} ، مساحت A_{fe} و ممان اینرسی مقطع I_{fe} مورد نیاز است. برای تعیین آن‌ها، عبارت سختی را می‌توان به صورت زیر تبدیل کرد:

$$(E_c I)_{struct} = \frac{E_{fe} t_{fe}^3 L}{12}, \quad (E_c A)_{struct} = E_{fe} t_{fe} L \quad (3)$$

در این جا t_{fe} ، ضخامت تیر استفاده شده در تحلیل اجزای محدود و L ، بعد عمود بر صفحه‌ی سازه است. مرتب‌سازی معادله (۳) منجر می‌شود به:

تغییر مکان در ناحیه میانی زیر مهار حاصل نشده، بلکه تا حدودی هم افزایش پیدا کرده است. به نظر می‌رسد علت چنین رفتاری، صلبیت تیر (ساختمان) در مقایسه با حالات قبل و نهایتاً انتقال بار به لایه‌های زیرین باشد؛ بنابراین، همان‌گونه که در مدل قبلی مشاهده شد، سختی سازه تأثیر قابل توجهی در میدان تغییر مکان و نیروهای داخلی سیستم مهاربندی دارد. در این روش، تأثیر سختی سازه بر میدان تغییر مکان زمین به نحو مقتضی مدل می‌شود، اما اثرات بر سازه واقعی از طریق میدان تغییر شکل تیر عمیق قابل تخمین خواهد بود.

یکی از نتایج حاصل از تحلیل با این روش، شکل تغییر شکل یافته تیر خواهد بود. از این شکل، اطلاعات ارزشمندی قابل برداشت است. برای مثال، می‌توان به خیز حداکثر، خیز نسبی، شیب در هر نقطه از طول تیر اشاره کرد. این اطلاعات با استفاده از تئوری تیر عمیق قابل ارتباط با مؤلفه‌های تانسور کرنش از جمله کرنش کششی و کرنش قطری در تیر خواهند بود. در قدم بعد بر اساس میزان این کرنش‌ها می‌توان ارزیابی از میزان آسیب سازه‌ی واقعی ارائه داد. از بسط روابط و ارائه‌ی این راهکار به علت حجیم شدن، صرف نظر شده است. قطعاً این راهکار می‌تواند به عنوان یک موضوع تحقیقی مورد توجه قرار گیرد.

مکان افقی دیوار از میانه به رأس آن تغییر محل یافته است. با افزایش بیش از ۱۰۰ کیلو پاسکالی، شدت بار شرایط خرابی برای مدل حاصل خواهد شد.

در اشکال (۱۲) و (۱۵) برای سربارهایی با سختی معادل دال تا شدت بارگذاری ۵۰ کیلو پاسکال میزان اختلاف نشست‌ها، نیروی ایجاد شده در مهارها و انحراف دیوار کمتر از ۲۰ درصد خواهد بود و همچنان تغییر مکان افقی حداکثر در میانه دیوار قرار دارد. سرعت افزایش تغییر مکان در ناحیه‌ی فوقانی دیوار، بیشتر از انحراف در میانه‌ی دیوار است، اما در هیچ‌کدام از تحلیل‌ها انحراف افقی در میانه دیوار کمتر از انحراف افقی ناحیه فوقانی نیست. مقایسه بین دو حالت ساختمان بدون سختی و ساختمان با سختی دال نشان می‌دهد که برای سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال حداکثر نشست سطح زمین از ۵۳/۴۶ میلی متر به ۲۸/۱۲ میلی متر و همچنین نیروی مهار از ۵۰۳/۴ به ۳۵۷ کیلو نیوتن کاهش پیدا کرده است. با اعمال سختی یک ساختمان سه طبقه مطابق اشکال (۱۳) و (۱۶)، مشاهده می‌شود که نشست سطح زمین و نیروی محوری در مهار به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است. در خصوص تغییر مکان افقی علیرغم کاهش قابل توجه در قسمت بالای مهار، دیده می‌شود که تا سربار ۱۵۰ کیلو نیوتن بر مترمربع نه تنها کاهش در

جدول ۲ پارامترهای مدل رفتاری برای خاک شماره ۱ در دو لایه

v_{ur}	ψ ($^{\circ}$)	ϕ' ($^{\circ}$)	c' (kPa)	m	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	γ_d (kN/m^3)	عمق لایه
۰/۲	۱۳	۳۶	۱	۰/۵۵	۱۰۰۰۰۰	۲۵۵۰۰۰	۹۰۰۰۰	۱۶/۰	۱۵-۰
۰/۲	۱۳	۳۶	۱	۰/۵۵	۲۶۰۰۰۰	۶۵۰۰۰۰	۲۳۰۰۰۰	۱۶/۰	۴۰-۱۵

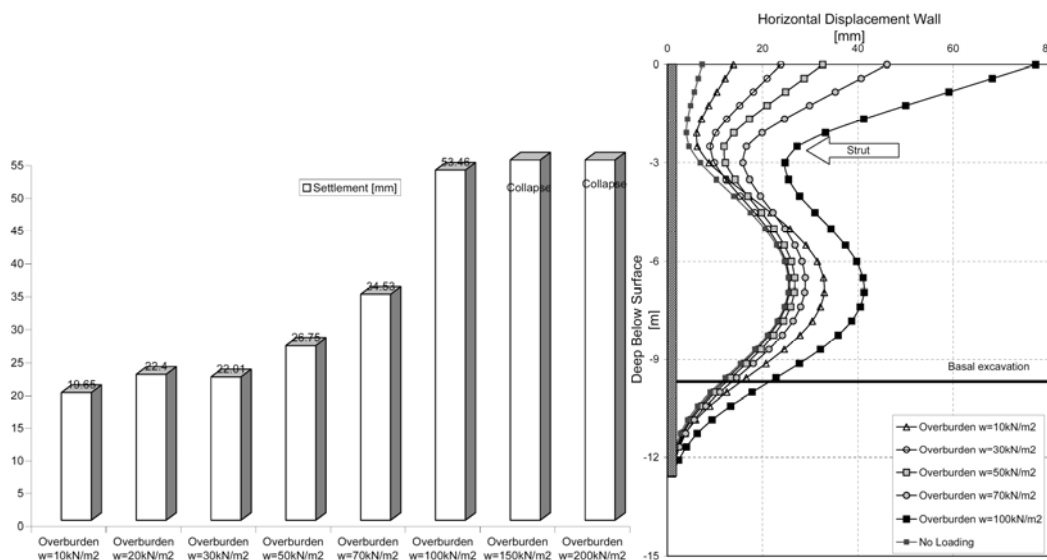
جدول ۳ مشخصات سختی و وزن سازه مجاور

تنش معادل ناشی از وزن ساختمان $\left[\frac{\text{kN/m}^2}{\text{m}} \right]$								سختی سازه		تعداد طبقات ساختمان برای محاسبه سختی	ردیف
								محوری (EA) _{struct} [kN/m]	خمشی (EI) _{struct} [kNm ² /m]		
-	-	۱۰۰	۷۰	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰	-	-	بدون سختی	۱
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۷۰	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰	$3/45 \times 10^6$	$6/47 \times 10^3$	دال	۲
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۷۰	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰	$6/90 \times 10^6$	$2/00 \times 10^7$	یک طبقه	۳
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۷۰	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰	$1/38 \times 10^7$	$2/00 \times 10^8$	سه طبقه	۴

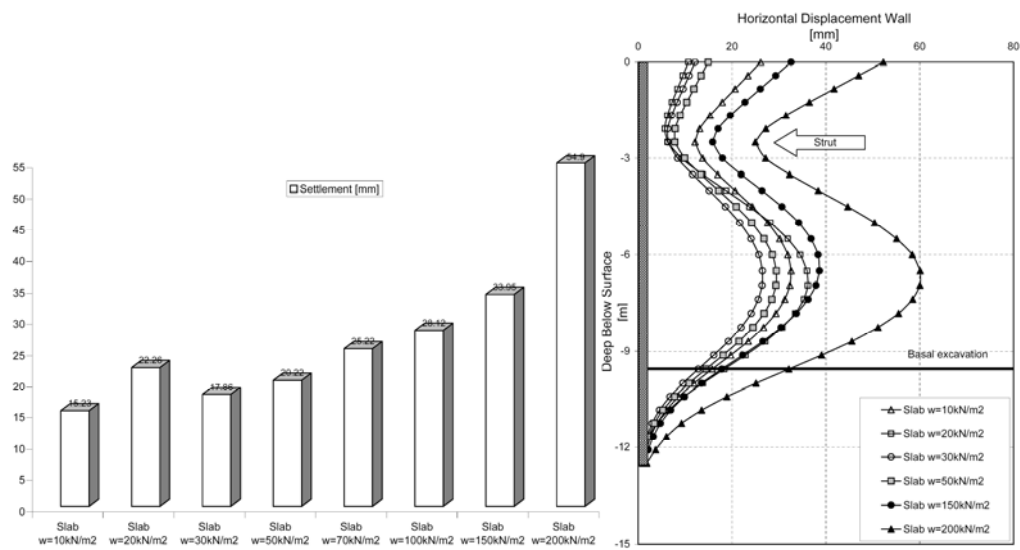
ضریب پواسون مربوط به المان تیر (در مدل ساختمان و دیوار) برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴ مشخصات المان‌های سازه‌ای به کار گرفته شده در تحلیل‌ها

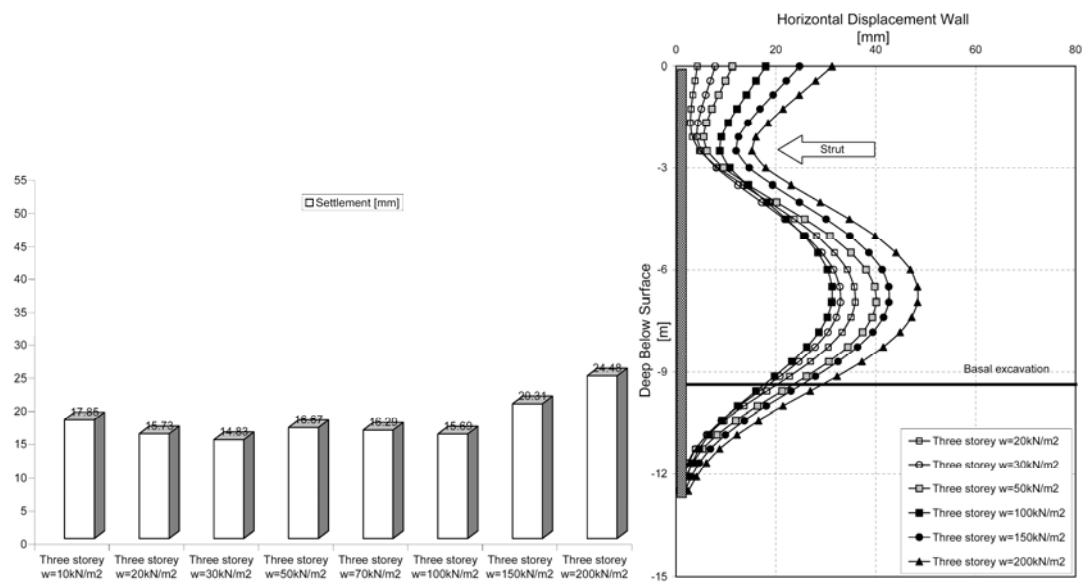
عضو مهارتی IPB220	دیوار IPB220	سختی
۱۹۱۰۰۰۰	۱۹۱۰۰۰۰	محوری EA (MN/m)
-	۱۶۹۹۱	خمشی EI (MNm ² /m)



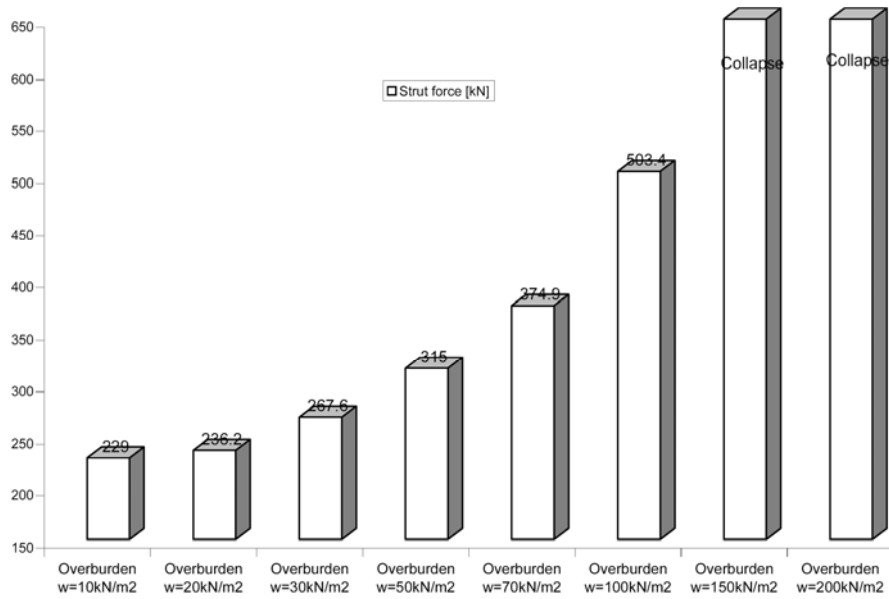
شکل ۱۱ انحراف دیوار و نشست حداکثر سطح زمین در اثر اعمال شدت بارهای مختلف بدون در نظرگیری سختی سازه‌ی مجاور



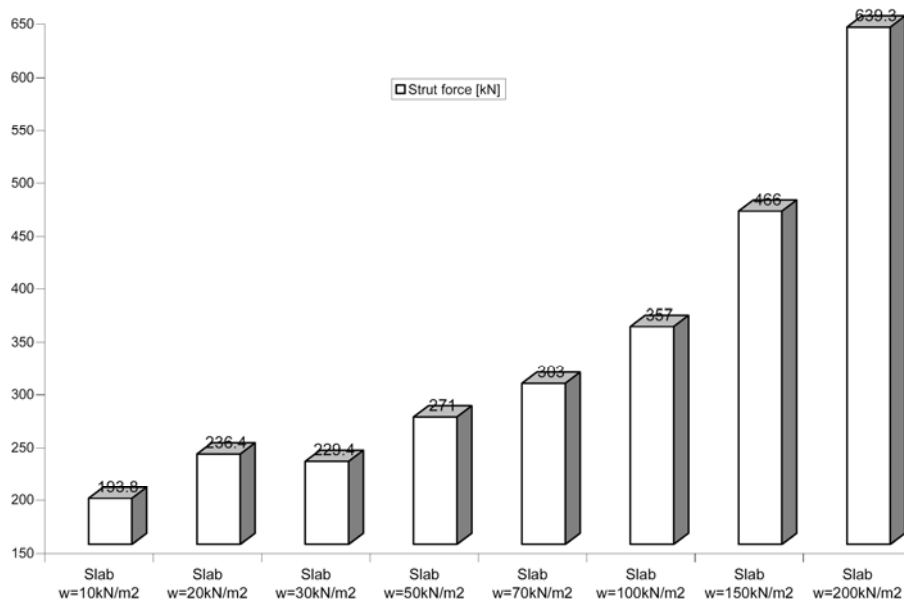
شکل ۱۲ انحراف دیوار و نشست حداکثر سطح زمین در اثر اعمال شدت بارهای مختلف با سختی سازه‌ی مجاور برابر سختی دال



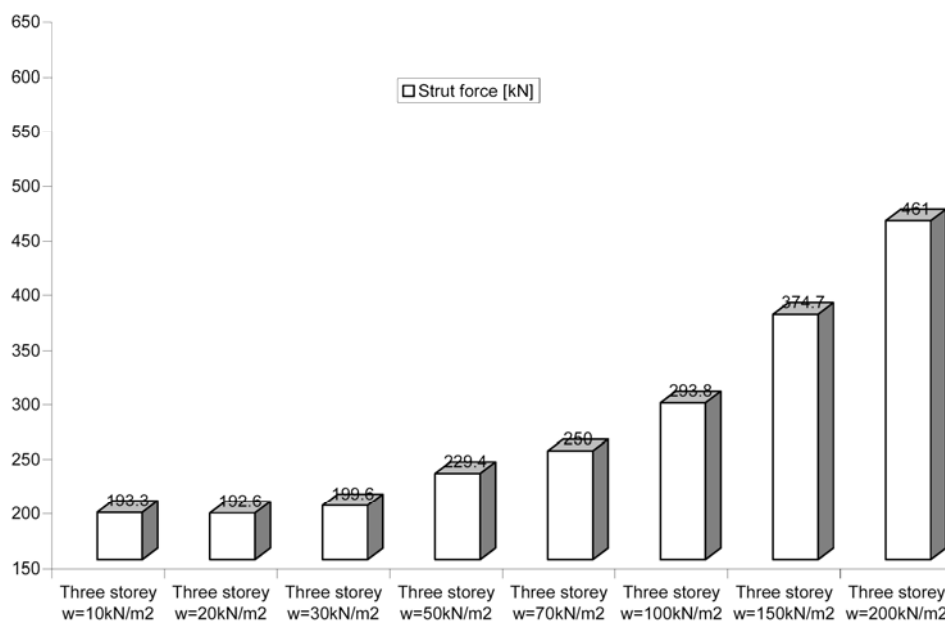
شکل ۱۳ انحراف دیوار و نشست حداکثر سطح زمین در اثر اعمال شدت بارهای مختلف با سختی ساختمان سه طبقه



شکل ۱۴ نیروی مهار تابعی از شدت بار وارده ناشی از ساختمان بدون سختی



شکل ۱۵ نیروی مهار تابعی از شدت بار وارده ناشی از ساختمان با سختی دال



شکل ۱۶ نیروی مهار تابعی از شدت بار وارده ناشی از ساختمان با سختی ساختمان سه طبقه

و کاهش نیروهای داخلی سیستم مهاربند گود می‌شود. نتایج حاصله از این تحقیق، نشان می‌دهند که سختی سازه موجب می‌شود تغییر مکان‌های افقی حداکثر در نواحی پائین دیواره گود اتفاق بیافتد؛ در صورتی که در حالت بدون در نظرگیری سختی تغییر مکان‌های افقی، حداکثر در نزدیکی سطح زمین است.

۲- تحلیل با مدل ساختمان به صورت تیر ارتجاعی معادل و تحلیل با اعمال جزئیات سازه‌ای نتایج نسبتاً مشابهی در کنترل تغییر مکان زمین ناشی از گود برداری در اختیار قرار می‌دهند.

۳- گرچه مدل کردن ساختمان مجاور به صورت تیر در خصوص تأثیر سختی سازه بر میدان تغییر مکان زمین و نیروهای داخلی سیستم مهاربند نتایج واقع بینانه‌ای به دست می‌دهد، اما برای تأثیر گودبرداری بر

نتیجه گیری

اندرکنش گودبرداری و سازه‌ی مجاور آن به عنوان یکی از عوامل مؤثر در تحلیل عددی گودبرداری‌های مهاربندی شده، نقش ایفا می‌کند. مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر سختی ساختمان مجاور، که این سختی در مدل تیر معادل شامل سختی‌های خمشی (EI) و محوری (EA) مربوط به این تیر است و در مدل واقعی سازه سختی مرتبط با بارهای بهره برداری (بار مرده با اضافه زنده) و تغییر مکان قائم پای ستون‌ها است، گودبرداری بر میدان تغییر مکان زمین و تأثیر گودبرداری بر نیروهای داخلی سازه این ساختمان پرداخته است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱- اعمال سختی سازه‌ی مجاور در تحلیل عددی سیستم گودبرداری تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. در بسیاری از حالات، این تأثیر منجر به کاهش تغییر مکان‌های افقی

است اندرکنش گودبرداری و سازه مجاور آن بنحو مطلوبی در طرح و محاسبه مد نظر قرار گیرد.

۵- مدل کردن سازه‌ی مجاور به صورت تیر معادل، گرچه از نظر میدان تغییرمکان زمین و سازه‌ی نگهدارنده نتایج مناسبی در اختیار قرار می‌دهد، ولی ارتباط میدان تغییرشکل تیر معادل به تغییرشکل‌های سازه واقعی نیازمند یک مجموعه مطالعات و محاسبات بوده که می‌تواند به عنوان توسعه کار حاضر مد نظر قرار گیرد.

نیروهای داخلی سازه، نیاز تحلیل عددی با در نظرگیری جزئیات سازه ای است.

۴- امروزه کدهای محاسباتی اجزاء محدود با توجه به کامپیوترهای بزرگ حافظه و سریع از یک طرف و مدل‌های رفتاری مناسب از طرف دیگر، امکان تحلیل عددی سازه‌های ژئوتکنیکی را با در نظر گرفتن هندسه و شرایط مرزی پیچیده و اعمال روش‌های اجرائی، در اختیار مهندسين طراح قرار داده است؛ لذا در خصوص گودبرداری‌ها در محیط‌های شهری لازم

مراجع

1. Clough, G. W., and O'Rourke, T. D., Construction induced movements of in- situ walls, Proc., ASCE Conf. on Des. and Perf. of Earth Retaining Struct. Geotech. Spec. Publ. No. 25, ASCE, New York, 439-470, (1990).
2. Seok, J.W., Kim, O.Y., Chung, C.K., and Kim, M.M., Evaluation of ground and building settlement near braced excavation sites model testing, Canadian Geotechnical Journal, October 2001, Vol. 38, No. 11, pp. 1127-1133, (2001).
3. Ou, C. Y., Hsieh, P. G., & Chiou, D. C., Characteristics of ground surface settlement during excavation, Can. Geotech. J. Vol. 30, No. 5, pp. 758-767, (1993).
4. Boscardin, M. D., & Cording, E. G., Building response to excavation induced settlement, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 115, No. 1, pp. (1989).
5. Finno, R. J., Calvello, M., & Bryson, S. L., Analysis and performance of excavation for the Chicago- State subway renovation project and its effect on adjacent structures, Technical Report of U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration, (2002).
6. Manual PLAXIS, Finite element code for soil and rock plasticity, Delft University of Technology, Netherlands.
7. Rahma, A., 1991, Modelisation probabilist des parameters de lois elasto-plastiques (modele cyclade), These de Doctora, Ecole Centrale Paris, Laboratoire de Mecanique Sols, Structures et Materiaux.
۸. بائی؛ بهادر، تحلیل عددی حرکت زمین ناشی از گودبرداری در محیط‌های شهری و بررسی عملکرد روش‌های مهاربندی رایج در کشور، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، مکانیک خاک و پی، گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه بوعلی سینا، (۱۳۸۲).

9. Potts, D.M. & Adenbrooke, T. I., A structures influence on tunnelling-induced ground movements, Proc. Instn. Civ. Engrs., Geotech. Engineering, 125, pp:109-125, (1997).
10. Long M., Database for retaining wall and ground movements due to deep excavation, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, Vol. 127, No. 3, pp. 203-224, (2001).
۱۱. بیٹی؛ م، تعیین روابط کاربردی در طرح و محاسبه گودبرداری‌ها در محیط‌های شهری، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد گرایش مکانیک خاک و پی، گروه عمران دانشکده فنی، دانشگاه بوعلی سینا، (۱۳۸۴).