

ارزیابی پایداری گود به روش ساخت از بالا در کنترل تغییر شکل دیواره‌های گود بر اساس بررسی‌های عددی و میدانی

وحید شیرغلامی، مهدی خداپرست*، ابوالقاسم معزی؛
دانشگاه قم، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران
تاریخ: دریافت ۹۸/۰۳/۰۴ پذیرش ۹۸/۱۱/۱۵

چکیده

جابه‌جایی زمین ناشی از حفاری در محدوده شهری، همواره با چالش‌های جدی از دیدگاه ژئوتکنیکی و سازه‌ای مواجه بوده است. در این زمینه آسیب دیدگی ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور گود به دلیل تجاوز مقادیر تغییر شکل زمین از محدوده مجاز، خسارات جبران ناپذیری را به همراه دارد. بنابراین پیش‌بینی حرکت زمین مجاور گود در طراحی‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد و طراحی سیستم مهاری گود، کنترل تغییر شکل جانبی دیواره گود و نشست سطح زمین امری اجتناب‌ناپذیر است. این پژوهش، به بررسی پایداری گود از دیدگاه تغییر شکل با استفاده از سازه اصلی به روش ساخت از بالا و بر اساس پروژه‌های واقعی می‌پردازد. برای این منظور، مراحل اجرا در روش ساخت از بالا به صورت مقطعی و با استفاده از دوربین توتال استیشن مورد پایش قرار گرفته و داده‌های حاصل از ابزارسنجی گود، بر اساس روش‌های آماری تحلیل شده است. در این رابطه مدل‌سازی مراحل مختلف پایداری گود با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۱ انجام شده و به منظور صحت‌سنجی و پیش‌بینی روند تغییر شکل‌ها، کالیبراسیون مدل عددی بر اساس نتایج حاصل از پایش‌های میدانی صورت پذیرفته است. در ادامه پارامترهای مختلف سیستم مهاری به منظور بررسی عملکردی، متغیر در نظر گرفته شده و در نهایت با استفاده از ۱۶۰ مدل عددی، امکان تخمین سختی مورد نیاز سیستم مهاری با توجه به تغییر شکل مجاز، در ۴ ساختگاه مختلف و در قالب روابط نمایی ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی تغییر شکل، روش ساخت از بالا، ابزارسنجی، روش المان محدود، طراحی مبتنی بر تغییر شکل

*نویسنده مسئول khodaparast@qom.ac.ir

1. ABAQUS

مقدمه

یکی از نگرانی‌های اصلی در حفاری سازه‌های زیرزمینی، اثرات ناشی از حرکت زمین بر روی سازه‌های مجاور است. در محیط‌های شهری، جابه‌جایی توده خاک اطراف گود ناشی از تغییر وضعیت تنش‌ها، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای بررسی عملکرد سازه‌های نگهدارنده احداث شده است و با وجود ساخت و سازهای فراوان در مناطق شهری به ندرت پیش می‌آید که در حفاری‌های زیرزمینی، شرایط تنش مؤثر در حالت سکون باشد [۱].

با توجه به اهمیت تغییرشکل‌های ناشی از حفاری در محیط‌های شهری، روش‌های مبتنی بر نیرو در طراحی دیوارها به‌عنوان بخشی از سیستم مهاري گود، ممکن است پیش‌بینی مناسبی از تغییر مکان‌ها ارائه ندهند، زیرا در برخی موارد وجود مقادیر کوچک تغییرشکل منجر به عملکرد نامناسب سیستم مهاري می‌شود. بر این اساس، مطابق با آیین‌نامه‌های جدید مانند آیین‌نامه کشور آمریکا (آشا)، طراحی بر اساس کنترل تغییرشکل، شاخص مفیدتری از عملکرد گود را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. بنابراین پایش‌های میدانی به‌منظور ارزیابی رفتار تغییر شکل‌ها در پروژه‌های گودبرداری امری ضروری است [۲]، [۳]. هم‌چنین محاسبه و پیش‌بینی تغییر شکل‌ها با استفاده از مدل عددی، نیازمند کالیبره کردن و صحت‌سنجی نتایج بررسی‌های عددی، با داده‌های حاصل از پایش‌های میدانی است.

طراحی و پایدارسازی گودهای عمیق، همواره مستلزم ملاحظات ژئوتکنیکی دقیق، انتخاب مناسب سیستم سازه نگهدارنده و مدل‌سازی عددی صحیح است. در روش‌های متداول حفاری‌های عمیق، روش ساخت از بالا^۱ دارای برتری‌هایی نسبت به روش‌های سازه نگهدارنده خرابایی، نیلینگ و انکراژ و غیره است. در پایدارسازی گود به‌شیوه ساخت از بالا، بر خلاف روش‌های معمول می‌توان عملیات ساخت و حفاری خاک را به‌صورت هم‌زمان انجام داد، که علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، بخش عمده‌ای از عناصر سازه‌ای صلب مانند دال‌های بتنی، تیرها و ستون‌ها ضمن اجرا شدن، به‌عنوان سیستم سازه نگهدارنده نیز عمل کرده و منجر به کاهش استفاده از مهاري‌های موقت می‌شود [۴]. هم‌چنین از دیگر ویژگی‌های پایدارسازی و اجرای گود با تکنیک ساخت از بالا، فراهم کردن شرایط لازم برای احداث سازه در فضاهای محدود

و یا پرتدد شهری (از قبیل ایستگاه‌های مترو و پارکینگ‌های طبقاتی و غیره) است [۵]. در این روش پس از جانمایی ستون‌های اصلی سازه مطابق پلان آکس‌گذاری، حفاری و اجرای دیوارهای حائل پیرامونی به صورت پانلی انجام شده و نسبت به تکمیل قاب‌های سازه‌ای و نصب تیرهای سقف در تراز صفر زمین اقدام می‌شود. سپس بتن‌ریزی سقف در تراز صفر زمین انجام شده و عملیات حفاری دیوارها و گودبرداری با در نظر گرفتن شرایط عمل‌آوری بتن و سایر پارامترها به سمت پایین و تا عمق مورد نظر، جهت اجرای سقف در ترازهای پایین و تکمیل دیوارهای حائل پیرامونی، ادامه می‌یابد. هم‌چنین هم‌زمان با پیش‌روی حفاری به سمت پایین، نسبت به تکمیل سقف‌ها در ترازهای بالاتر اقدام می‌شود. سپس عملیات مذکور تا عمق نهایی و اجرای فونداسیون در کف گود، تکرار می‌شود.

این پژوهش به بررسی پایدارسازی گود با استفاده از سازه اصلی به روش ساخت از بالا می‌پردازد که از روش‌های نوین پایدارسازی گود در ایران به‌شمار می‌آید. برای این منظور، مطالعات میدانی و عددی روی پروژه پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا واقع در محدوده مرکزی شهر قم، صورت گرفته است. این پژوهش شامل تحلیل اطلاعات حاصل از عملیات پایش، مدل‌سازی با نرم‌افزار المان محدود آباکوس، تعیین حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی به منظور کالیبره کردن مدل عددی و پیش‌بینی روند تغییرشکل‌ها تا پایان عملیات حفاری با استفاده از مطالعات عددی است. هم‌چنین ضمن رفتارنگاری دو مقطع مهم از گود، در نهایت تخمین اولیه سختی مورد نیاز سیستم مهاری، با توجه به تغییر شکل جانبی و به صورت روابط نمایی در قالب چهار ساختگاه پیشنهادی مطابق با بررسی‌های خط (A) مترو قم، ارائه می‌شود.

تحقیقات پیشین

پژوهش‌های تجربی و ساده‌سازی‌های کلاف^۱ و کانگ^۲ نشان می‌دهد نرم‌افزارهای اجزا محدود، تخمین مناسبی از تغییرشکل دیواره گود و اندرکنش خاک و سازه ارائه می‌دهند. با این وجود بعضاً در پیش‌بینی نشست سطح زمین دارای نتایج قابل قبولی نیست. بنابراین ثبت داده‌های حاصل از برداشت‌های میدانی به منظور مقایسه و اطمینان از نتایج مدل عددی

1. Clough & O'Rourke
2. Kung

ضروری است [۶]، [۷]. همچنین براساس مطالعه تنگ^۱، معمولاً شبیه‌سازی خاک‌ها با خاصیت غیر ایزوتروپ، منجر به افزایش دقت در پیش‌بینی پروفیل نشست می‌شود. به همین منظور پارامتر سختی غیرایزوتروپیک برای خاک به صورت نسبت مدول برشی در صفحه قائم به مدول برشی در صفحه افقی تعریف شد [۸].

مطابق با پژوهش وانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۰)، رابطه بین تغییر شکل جانبی بیشینه دیوار در برابر سختی سیستم و ضریب اطمینان در برابر بالا آمدگی کف، در زمین‌هایی رسی نرم بررسی شد [۹]. نتایج نشان داد، نشست بیشینه زمین مجاورگود برای ۳۰۰ مورد بررسی شده، در محدوده ۰/۱٪ تا ۰/۸٪ و با مقدار میانگین ۰/۴۲٪ از عمق نهایی گود است که این مقادیر متناظر با پژوهش‌های لانگ^۳ برای زمین‌های حاوی خاک نرم با ضخامت بیش از $H/6$ و با بستر سخت در کف گود است [۱۰]. همچنین مشخص شد، حفاری به‌شیوه ساخت از بالا در پژوهش وانگ، با کم‌ترین میزان تغییر شکل بیشینه جانبی همراه است (متوسط برابر با ۰/۲۷٪ از عمق گود)؛ که دلیل آن می‌تواند استفاده از دال‌های بتنی با سختی زیاد باشد.

در فرآیند رفتارنگاری گود، استفاده از دوربین توتال استیشن و منشور برجسی ابزار ساده و متناسب است که امکان پایش جابه‌جایی‌ها را فراهم می‌کند. به این صورت که در طول عملیات پایش، جابه‌جایی نقاط مرجع باید پیوسته صفر باشد تا فرصت تعیین تغییر شکل‌ها نسبت به نقاط مرجع و همچنین تعیین دقت عملیات پایش فراهم شود [۱۱]. همچنین استفاده از زاویه‌سنج‌ها^۴ یکی از ابزارهای مفید برای پایش گود است. مطابق پژوهش‌های فینو^۵ زاویه‌سنج‌ها، ابزار کاربردی برای پایش نشست زمین در نقاط مختلف گود است [۱۲]. پژوهش‌های مشابهی به‌وسیله یانگ^۶ با استفاده از دوربین توتال استیشن خودکار انجام شد که در آن دقت روش ۰/۸ میلی‌متر محاسبه شد. در سال‌های اخیر نیز روش اندازه‌گیری از راه دور RDM با استفاده از دوربین‌های معمولی و با دقت ۰/۴ تا ۰/۷ میلی‌متر، پیشنهاد شد [۱۳]، [۱۴].

-
1. Teng
 2. Wang
 3. Long
 4. Inclinator
 5. Finno
 6. Yong

محققان مختلف در سال‌های اخیر به دنبال بهبود عملکرد روش پایدارسازی ساخت از بالا با اعمال اصلاحاتی در مراحل حفاری و پایدارسازی بوده‌اند. عواملی نظیر بهینه‌سازی زمان و هزینه و آسان نبودن اجرا موجب شد تا مهندسان به دنبال تکنیک‌های جدید و اصلاح روش‌های موجود در عملیات حفاری و اجرا در فضاهای زیرزمینی، با استفاده از سیستم باشند [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]. سیستم قالب‌بندی معلق برای ایجاد فضای کار مناسب در عملیات حفاری و به منظور عمل‌آوری بتن به وسیلهٔ هانگ^۱ استفاده شد. [۱۸]. هم‌چنین استفاده از سیستم یک‌پارچه شامل دیوارهای پشت‌بنددار به همراه دیوارحائل برای کنترل تغییرشکل گود عمیق با روش ساخت از بالا به وسیلهٔ لیم و هسیه^۲ پیشنهاد شد. مکانیزم کنترل تغییرشکل در این سیستم معمولاً به ترکیبی از سختی سیستم دیوارهای پشت‌بند- دیوار حائل و مقاومت اصطکاکی بین دیوارهای پشت‌بند و خاک اطراف بستگی دارد [۱۹].

عملکرد پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا در ساختگاه‌های رسی نرم نشان می‌دهد که سختی سیستم مهاري نقشی اساسی در عملکرد این روش ایفا کرده و از سوی دیگر با زمان‌بر بودن عملیات اجرایی در گودهای بزرگ مواجه است. به همین دلیل تغییر شکل‌های جانبی و نشست سطح زمین به زمان وابسته می‌شود. هم‌چنین انجام عملیات حفاری به صورت مرحله‌ای و اجرای دال‌های بتنی در جاریز سبب کاهش پدیده تورم و بال‌آمدگی خاک ناشی از باربرداری در تراز نهایی کف گود می‌شود [۵].

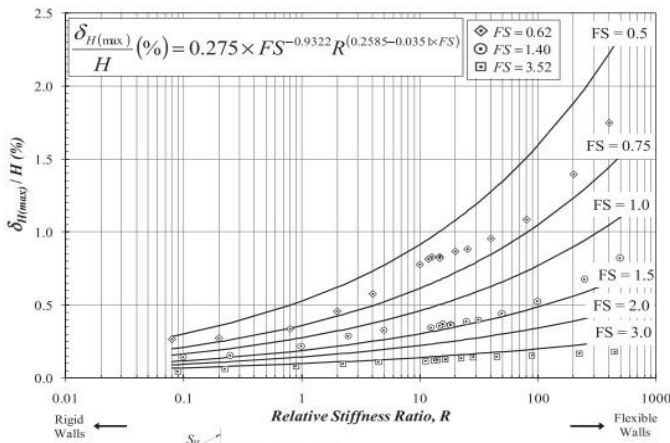
بریسون و زاپاتا^۳ (۲۰۱۰) نشان دادند که سختی دیوارحائل به عنوان بخشی از سیستم مهاري گود، در خاک رسی نرم و متوسط نقش برجسته‌ای را ایفا می‌کند. استفاده از ورق فولادی سخت‌تر به عنوان دیوار حائل، در خاک رسی نرم تا ۳۲٪ تغییر شکل جانبی را محدود می‌کند اما در خاک رسی سفت، سختی دیوار تأثیر زیادی بر مهار تغییر شکل جانبی ندارد که این مسئله با بررسی‌های کلاف مبنی بر تأثیر کم سختی دیوار و فاصلهٔ مهارها در خاک رسی سفت مطابقت دارد. براساس پژوهش ایشان پارامتر سختی دیوار، بیش‌ترین تأثیر را در تعیین سختی سیستم مهاري داشته و برای سیستم‌هایی که دارای سختی کم‌تر از ۲۵۰ هستند نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد کلی سیستم مهاري ایفا می‌کند. سال (۲۰۱۲) پارامتری بدون بعد

-
1. Hong
 2. Lim & Hsieh
 3. Brayson and Zpata

با عنوان سختی نسبی سیستم مهاری (R) به وسیله بریسون و زاپاتا معرفی شد. مطابق با رابطه (۱)، سختی نسبی سیستم مهاری در حفاری گود با استفاده از بررسی‌های عددی سه‌بعدی و مطالعات پارامتری معرفی شده است [۲۰]، [۲۱].

$$R = \frac{E_s}{E} * \frac{Sh * Sv * H}{I} * \frac{\gamma_s * He}{Su} \quad (1)$$

در این رابطه (Es) مدول الاستیسیته خاک، (E) مدول الاستیسیته دیوار، (Sh) و (Sv) به ترتیب فاصله افقی و قائم مهاری‌ها، (H) ارتفاع دیوار، (He) ارتفاع گود، (γs) میانگین وزن مخصوص خاک و (Su) مقاومت برشی زهکشی نشده خاک در کف گود است. جمله اول در این رابطه بیانگر اندرکنش خاک و سازه، جمله دوم بیانگر مشخصات المان‌های مهاری و دیوار حائل و جمله سوم بیانگر عدد پایداری گود است که مطابق با پژوهش‌های پک^۱ شرایط خاک را بیان می‌کند. مقادیر کوچک (R) نشان‌دهنده دیوارهای سخت مانند دیوارهای دیافراگمی است و مقادیر بزرگ‌تر آن، بیانگر دیوارهای انعطاف‌پذیر مانند ورق‌های فولادی است. شکل ۱ بیش‌ترین تغییر شکل جانبی ثبت شده در انتهای حفاری را در برابر سختی نسبی سیستم مهاری و ضریب اطمینان در برابر بالآمدگی، در خاک‌های رسی مختلف نشان می‌دهد. هم‌چنین به طراح اجازه می‌دهد تا تغییر شکل جانبی بیشینه دیوار در خاک چسبنده را با توجه به هندسه گود پیش‌بینی کند.



شکل ۱. تغییر شکل جانبی بر اساس سختی نسبی سیستم مهاری و ضریب اطمینان در برابر بالآمدگی (بریسون و زاپاتا) [۲۰]

شرایط ساختگاهی

بر اساس بررسی‌های زمین‌شناختی مسیر خط (A) تونل مترو قم (مؤسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۰)، لایه‌های زمین به چهار واحد خاکی تفکیک شده‌اند. واحد خاک (Qc-1) متشکل از شن ماسه‌دار و یا ماسه شن‌دار با درصد ریزدانه ۵ تا ۲۰ درصد، واحد خاکی (Qc-2) متشکل از شن ماسه لای و رس‌دار به همراه شن، با درصد ریزدانه ۳۵ تا ۶۰ درصد، واحد خاکی (Qf-1) متشکل از لای رس‌دار به همراه اندکی ماسه با درصد ریزدانه بیش از ۶۰ درصد و اندیس خمیری کم‌تر از ۷ و واحد خاکی (Qf-2) متشکل از رس لای‌دار با مقدار اندکی ماسه با درصد ریزدانه بیش از ۶۰ درصد و اندیس خمیری بیش از ۷ است. با توجه به بررسی‌های ساختگاهی انجام شده در مسیر خطوط (A) و (B) مترو قم، نتایج نشان می‌دهد که بخش چشم‌گیری از خاک استان قم به همین چهار نوع ساختگاه محدود می‌شود. بنابراین امکان تخصیص تعداد چشم‌گیری از پروژه‌های گودبرداری در محدوده شهر قم، به هریک از چهار تپ ساختگاه مورد بحث، با در نظر گرفتن پارامترهای پیشنهاد شده از این پژوهش وجود دارد. جدول ۱ پارامترهای مقاومتی و سختی پیشنهادی برای چهار واحد خاکی نشان می‌دهد [۲۲].

مطابق شکل ۲، مسیر خط (A) مترو قم از محدوده مطالعه موردی در این پژوهش (مجتمع تجاری سلام)، واقع در بلوار عمار یاسر (ایستگاه A6)، عبور می‌کند. هم‌چنین بر اساس بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام شده در محل پروژه (جدول ۲)، می‌توان ادعا کرد که شرایط ساختگاهی در ترازهای نزدیک به سطح زمین از واحد (Qc-2) و در ترازهای پایین‌تر از واحدهای (Qc-1) و (Qf-2) تشکیل شده است. لازم به ذکر است طی اجرای پروژه، حفاری تونل مترو انجام نشده است [۲۳].

مشخصات پروژه و معرفی روش پایدارسازی گود

پروژه مجتمع تجاری سلام، واقع در محدوده مرکزی شهر قم و دارای ۶ طبقه با تراز منفی و در مجموع ۱۲ طبقه می‌باشد. این پروژه از سمت جنوب به بلوار اصلی و از سه جهت دیگر به بافت‌های فرسوده محدود شده است. عمق نهایی گود برداری ۲۱- متر، طول گود ۳۶ متر و عرض گود نیز بین ۳۲ تا ۵۲ متر متغیر است. با توجه به مجاورت پروژه با بافت فرسوده، حفاری و اجرا با روش ساخت از بالا در دستور کار قرار گرفت. سیستم سازه‌ای



شکل ۲. مسیر خطوط مترو روی نقشه شهر قم (مؤسسه مهندسی مشاور ساحل ۱۳۹۰) [۲۲]

تشکیل‌دهنده آن قاب خمشی فولادی و به صورت ترکیبی از دیوار حائل و برشی بوده و بر اساس طراحی انجام شده در این پروژه، به منظور سهولت در عملیات حفاری، دال‌های بتنی با استفاده از سیستم عرشه فولادی و بدون نیاز به پایه‌های اطمینان اجرا شد، تا فضای کاری کم‌تری برای تکمیل سازه در حین اجرای سقف‌ها اشغال شود. هم‌چنین عملیات اجرای سازه پروژه به نحوی انجام شد که امکان احداث رمپ خاکی تا تراز ۱۰- متری به منظور عبور ماشین‌آلات حفاری فراهم شود. لازم به ذکر است در طول ساخت پروژه، عملیات حفاری مسیر تونل مترو انجام نشد. مراحل ساخت در این پروژه بدین شرح است:

۱. پس از تعیین آکس‌گذاری دقیق ستون‌ها، گمانه‌هایی به صورت دستی تا تراز پایین‌تر از طبقه منفی شش و با در نظر گرفتن ضخامت فونداسیون سازه و شمع زیر ستون‌ها، حفاری شده و پس از جانمایی آرماتور شمع منفرد به همراه ستون فلزی داخل گمانه‌ها، بتن ریزی شمع به صورت درجا انجام شد. لازم به ذکر است که این شمع‌ها در تراز زیر فونداسیون اصلی سازه برای هر ستون اجرا می‌شود تا به عنوان یک پی منفرد برای هر ستون عمل کند. سپس گمانه‌های حفر شده مجدداً از خاک موجود پر شده تا پایداری ستون‌ها تأمین شود. سپس گمانه‌های حفر شده مجدداً از خاک موجود پر شده تا پایداری ستون‌ها تأمین شود (شکل ۳ الف). هنگام جانمایی ستون‌ها معمولاً دستک‌هایی به صورت پایه در قسمت بالای ستون‌ها اجرا شده تا پس از قرار گرفتن در آکس دقیق خود، دچار حرکت کوچک نشود.

جدول ۱. پارامترهای مقاومتی و سختی پیشنهادی برای چهار واحد خاکی (مؤسسه مهندسين مشاور ساحل) [۲۲]

مشخصات خاک		Qc-1	Qc-2	Qf-1	Qf-2
چسبندگی (kg/cm ²)	C'	۰.۰۵ ± ۰.۰۵	۰.۱۵ ± ۰.۰۲	۰.۱ ± ۰.۰۲	۰.۲ ± ۰.۰۵
	C cu	-	۰.۴ ± ۰.۱	۰.۲ ± ۰.۰۵	۰.۵ ± ۰.۱
زاویه اصطکاک (degree)	φ'	۳۶ ± ۳	۳۲ ± ۳	۳۰ ± ۳	۲۷ ± ۴
	φcu	-	۲۱ ± ۲	۲۴ ± ۲	۱۹ ± ۲
مدول الاستیک (kg/cm ²)	بارگذاری	۳۰۰ ± ۵۰	۲۲۰ ± ۵۰	۱۹۰ ± ۵۰	۱۸۰ ± ۵۰
	باربرداری	۹۰۰ ± ۵۰	۷۰۰ ± ۵۰	۵۷۰ ± ۵۰	۶۰۰ ± ۵۰
مدول الاستیک در پی نواری (kg/cm ²)	بارگذاری	۱۵۰ ± ۵۰	۱۲۰ ± ۵۰	۱۱۰ ± ۵۰	۱۰۰ ± ۵۰
	باربرداری	۴۷۰ ± ۵۰	۳۸۰ ± ۵۰	۳۳۰ ± ۵۰	۳۵۰ ± ۵۰
ضریب پواسون ν		۰.۳	۰.۳	۰.۳۲	۰.۳
وزن مخصوص خشک (g/cm ³)		۱.۷ ± ۰.۱	۱.۶ ± ۰.۱	۱.۵۵ ± ۰.۱	۱.۶ ± ۰.۱
وزن مخصوص کل (g/cm ³)		۲ ± ۰.۱	۱.۹۳ ± ۰.۱	۱.۸۵ ± ۰.۱	۱.۹۵ ± ۰.۱
پارامترهای تحکیم	Cc	-	-	۰.۳	۰.۱۷
	Cs	-	-	۰.۰۳۸	۰.۰۲۸
	OCR	-	-	NC	۲.۵ ± ۱

جدول ۲. لوگ گمانه حفاری شده در منطقه بررسی شده (مهندسين مشاور پی بنیان ایستا، ۱۳۹۳) [۲۳]

عمق	شناسایی نوع خاک	طبقه بندی				وزن مخصوص (g/cm ³)		پارامترهای مقاومتی				
		اندازه دانه ها			حدود اتربرگ		ترکیب	عدد نفوذ استاندارد	برش مستقیم			
		در صد شن	در صد ماسه	در صد ریزدانه	حد خمیری	حد روانی			زاویه اصطکاک داخلی (D)	چسبندگی (kg/cm ²)	نوع آزمایش	
۲	ماسه لای	۰	۶۰	۴۰	-	NP	۱.۶۹	۱.۶۳	۲۲	۲۳	۰.۰۶	سریع
۴	دار و لای ماسه دار	۰	۵۴	۴۶	-	NP	۱.۷۵	۱.۶۷	۲۵			
۶	با تراکم متوسط	۰	۴۷	۵۳	-	NP	۱.۸۴	۱.۶۴	۲۵			
۸	رس لای دار	۱۷	۶۹	۱۴	-	NP	۱.۷۴	۱.۷۴	۲۸			
۱۰	رس لای دار	-	۸	۹۲	۲۸	۷	۱.۷۶	۱.۵۶	۲۲	۲۱	۰.۲	سریع

شناسایی نوع خاک		طبقه بندی					وزن مخصوص (g/cm ³)		پارامترهای مقاومتی			
									عدد نفوذ استاندارد		برش مستقیم	
		عمق	لایه بندی	اندازه دانه ها			حدود اتربرگ		تر	خشک	N2+N3	زاویه اصطکاک داخلی (D)
در صد شن	در صد ماسه			درصد ریزدا نه	حد روان ی	حد خمیر ی	تر	خشک				
۱۲	ماسه همراه	۳۳	۵۴	۱۳	-	NP	۱.۶۹	۱.۶۹	۳۲	۲۷	۰.۰۶	سریع
۱۴	با شن و لای با تراکم زیاد	۲۲	۷۰	۸	-	NP	۱.۷۵	۱.۷۱	۳۲			
۱۶		۲۵	۶۹	۶	-	NP	۱.۷۶	۱.۹۸	۲۸			
۱۸	شن ماسه دار	۷۱	۲۵	۴	-	NP	۲.۰۵	۲.۰۱	>۵۰	۳۸	۰.۰۲	سریع
۲۰		۶۸	۲۲	۱۰	-	NP	۲.۱	۲.۰۶	>۵۰			
۲۲		۴۹	۴۴	۷	-	NP	۲.۱۵	۱.۶۶	>۵۰			
۲۴	رس لای دار و لای به همراه ماسه با تراکم متوسط	-	۳۰	۸۰	۲۹	۷	۱.۸۶	۱.۵۸	۲۴	۲۶	۰.۱۳	سریع
۲۶		-	۲۳	۷۷	۲۷	۷	۱.۷۹	۱.۷۵	۲۵			
۲۸		-	۶	۹۴	-	NP	۱.۹۵	۱.۷۵	۲۵			
۳۰		-	۱۲	۸۸	۲۴	۶	۱.۸۵	۱.۶۵	۲۷			
۳۲		-	۴۸	۵۲	-	NP	۱.۸	۱.۶۱	۲۵			
۳۴	شن ماسه دار	۴۵	۴۹	۶	-	NP	۱.۸۴	۱.۷۶	>۵۰	۲۹	۰.۰۱	سریع
۳۶		۴۳	۴۱	۱۶	-	NP	۲.۰۹	۱.۹۹	>۵۰			
۳۸	رس لای دار	-	۶	۹۴	۲۱	۶	۱.۸۵	۱.۶۳	۲۸	۲۱	۰.۲۲	سریع
۴۰		-	۸	۹۲	۳۰	۵	۱.۸۷	۱.۶۷	۲۷			

۲. دیوار حائل پیرامونی از تراز صفر و به تدریج با پیشرفت حفاری به صورت پانلی، قالب بندی و بتن ریزی شد (شکل ۳ الف). برای این منظور در ترازهای پایین، حفاری

- ترانشه به عمق‌های حدود ۳ تا ۴ متر و عرض ۱/۵ متر به صورت یک دهانه در میان انجام شده و آرماتور بندی دیوار حائل پیرامونی گود، اجرا شد.
۳. پس از تکمیل دیوارهای حائل در یک و یا دو تراز، قاب‌های سازه به مرور و هم‌زمان با حفاری و اجرای دیوارهای پیرامونی تکمیل شد (شکل ۳ ب). هم‌چنین در هر مرحله با توجه به فضاهای مورد نیاز برای انجام عملیات حفاری و ساخت، دال‌های بتنی در هر تراز اجرا شده تا صلبیت سیستم سازه‌ای که به‌عنوان سازه نگهبان نیز عمل می‌کند، با پیش‌روی حفاری به سمت پایین افزایش یابد (شکل ۳ ج).
۴. حفاری و تکمیل اسکلت سازه مطابق با برنامه ساخت پروژه تا تراز فونداسیون ادامه یافت.
۵. در نهایت با رسیدن به تراز فونداسیون، دیوارهای پیرامونی و ستون‌های سازه در فونداسیون محصور و به صورت یک پارچه بتن‌ریزی شدند (شکل ۳ د).
۶. مراحل تکمیل سقف‌های باقی‌مانده در ترازهای مختلف انجام گرفت.
- مراحل مختلف پایدارسازی مقاطع مورد پایش در شکل ۳ نشان داده شده است.

ابزارسنجی و عملیات پایش

بررسی‌های میدانی در پروژه عمار یاسر از فروردین ۱۳۹۵ به مدت یک سال انجام شد. در این پروژه تغییر شکل دیواره گود در سه مقطع (A) و (B) و (C) که به واسطه وجود ساختمان سه طبقه و بافت فرسوده در مجاورت گود، بحرانی تشخیص داده شد، با استفاده از دوربین توتال استیشن پایش شد. در هر مقطع تارگت‌گذاری از تراز صفر به فواصل قائم ۱/۵ متری انجام شد. با توجه به اجرا سقف‌ها از بالا به سمت پایین و ایجاد محدودیت در عملیات پایش، در هر مقطع حداکثر ۹ تارگت در ترازهای ۰، -۱/۵، -۳، -۴/۵، -۶، -۷/۵، -۹، -۱۰/۵، -۱۳ و در مجموع ۲۷ منشور برجسیبی درون گود نصب و قرائت شد. محدوده پروژه و مقاطع پایش شده (A) و (B) و (C) به همراه ۶ نقطه مرجع با نام‌های (R1) تا (R6M)، در شکل ۳ نشان داده شده است.

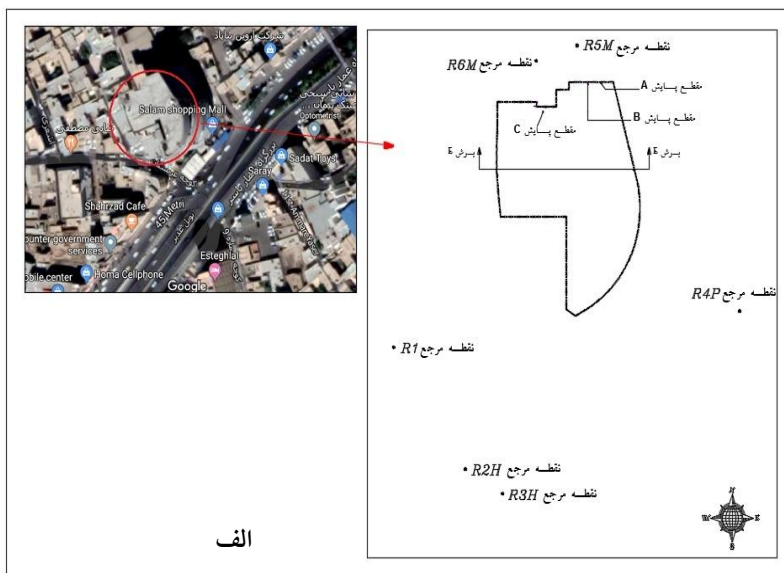
هم‌چنین ۶ نقطه مرجع ثابت با نام‌های (R1)، (R2H)، (R3H)، (R4P)، (R5M) و (R6M) روی ساختمان‌های اطراف گود با رعایت فاصله و دید مناسب به منظور قرائت با

دوربین در هر دوره از پایش انتخاب شد. محدوده پروژه و مقاطع پایش شده (A) و (B) و (C) به همراه ۶ نقطه مرجع، مطابق شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. مراحل مختلف پایدارسازی مقاطع پایش شده، الف) جانمایی ستون‌ها داخل چاهک و اجرای دیوارهای پیرامونی، ب) تکمیل قاب‌های سازه و سقف‌ها، ج) بتن ریزی دال‌ها و انجام عملیات حفاری تا تراز فنداسیون به صورت مرحله‌ای، د) تکمیل فونداسیون

مکانیزم عملیات پایش به این صورت بوده است که بعد از تعیین نقاط مورد نظر در داخل گود، نقاط مرجع نیز در فواصل مناسب از گود، انتخاب شده که براساس آن تغییر شکل نقاط درون گود با استفاده از این نقاط مرجع اندازه‌گیری شود. فرض بر این است که در طول پروسه حفاری و احداث سازه نگهدارنده، نقاط مرجع بدون جابه‌جایی هستند. به همین دلیل این نقاط، باید در فواصل مناسب از محل بررسی شده انتخاب شده تا تحت تأثیر عملیات حفاری و احداث سازه نگهدارنده قرار نگیرند.



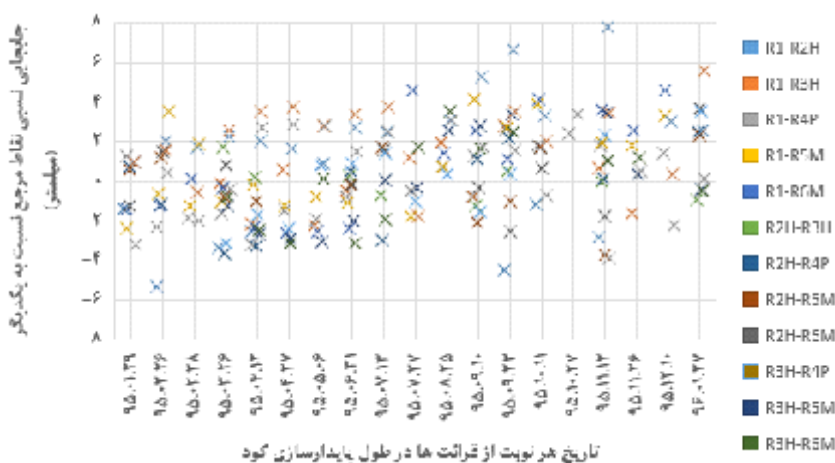
شکل ۴. الف) پلان پروژه مورد نظر و موقعیت نقاط مرجع در پایش با دوربین توتال استیشن،
 ب) برش E موقعیت نقاط پایش شده درون گود

هنگام تعیین نقاط مرجع باید در نظر داشت که با افزایش فاصله نقاط، خطای اندازه‌گیری نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین نقاط درون گود که تغییر شکل آنها حائز اهمیت است، باید در تمام مدت حفاری و احداث سازه نگهبان به‌خوبی قابل رویت باشد و امکان پایش آنها با استفاده از دوربین توتال استیشن وجود داشته باشد. در نهایت با برداشت مختصات نقاط تارگت‌گذاری شده درون گود، طی هر دوره عملیات پایش، تغییر در فاصله بین نقاط داخل گود از نقاط مرجع، بیان‌گر تغییر شکل نقاط درون گود است.

طی این دوره ۱۲ ماهه، در مجموع ۱۹۵ مرتبه فاصله نقاط مرجع نسبت به یک‌دیگر اندازه‌گیری شدند. برای این منظور، میانگین فاصله نسبی نقاط مرجع از یک‌دیگر و انحراف معیار آنها محاسبه شد. مطابق شکل ۵، جابه‌جایی نسبی نقاط مرجع نسبت به یک‌دیگر برای هر نوبت از قرائت‌ها روی نمودار نمایش داده شده است. در شکل ۵ هر یک از نقاط روی نمودار فاصله نسبی نقاط مرجع (R1) تا (R6M) نسبت به یک‌دیگر است (در شکل ۴ الف موقعیت نقاط مرجع مشخص شده است). هرکدام از این نقاط در هر نوبت از پایش‌های میدانی نسبت به ۵ نقطه مرجع دیگر اندازه‌گیری شده، میانگین فواصل هر نقطه با نقاط مرجع دیگر در ۱۹ نوبت قرائت شده و تفاضل هر مقدار از مقدار میانگین، پس از محاسبه روی نمودار آورده شد. به‌عبارت دیگر منظور از R1-R2H, R1-R3H و غیره، ذکر شده در قسمت Legend نمودار، همان نقاط مرجع نسبت به یک‌دیگر است که تغییرات فاصله آنها در هر نوبت از قرائت‌ها روی نمودار نشان داده شده است. این کار به‌منظور تعیین دقت دوربین و صحت عملیات پایش انجام گرفت. به این صورت که با توجه به ثابت بودن نقاط ثابت مرجع که با فاصله مناسب از گود انتخاب شده‌اند، این نقاط باید در تمامی پایش‌ها یک فاصله با یک‌دیگر داشته باشند. بیش‌ترین جابه‌جایی نسبی نقاط مرجع نسبت به یک‌دیگر ۷/۱ میلی‌متر و جابه‌جایی نسبی برای ۱۸۱ داده در محدوده ۰ تا ۳/۹ میلی‌متر (دو برابر انحراف معیار متوسط) قرار دارد. بنابراین تنها ۱۲ داده دارای جابه‌جایی بیش از ۳/۹ میلی‌متر هستند. با توجه به آن‌که دقت دوربین توتال استیشن^۱ در قرائت با منشورهای برچسبی تا فاصله ۲۵۰ متری، ۵ میلی‌متر تعیین شده است [۲۴]، مشخص می‌شود که عملیات برداشت‌های میدانی

1. Total station TS02

(اندازه‌گیری تغییر شکل جانبی نقاط درون گود نسبت به نقاط مرجع) با دقت مناسبی انجام شده است. با تعیین دقت عملیات پایش، تغییر در فاصله نقاط درون گود از نقاط مرجع در هر نوبت قرائت، بیان‌گر تغییرشکل دیواره گود است [۲۵].



شکل ۵. پراکندگی داده‌ها در محدوده انحراف معیار متوسط

بر اساس شکل ۶ تغییرشکل نقاط در هر سه مقطع برای ترازهای مختلف در طول پایدارسازی گود ارائه شده است. نقاط (A1 الی A8)، (B1 الی B9) و (C1 الی C7) منشورهای برجسیبی نصب شده در ترازهای مختلف به منظور اندازه‌گیری تغییر شکل جانبی نقاط است. مطابق شکل، بیش‌ترین تغییرشکل جانبی ثبت شده ۴۷ میلی‌متر و در ترازهای بالای گود، گزارش شده است. با پیش‌روی حفاری به تراز پایین‌تر از ۷ متر، مقادیر تغییرشکل جانبی ثبت شده تا پایان عملیات حفاری، کم‌تر از ۳۰ میلی‌متر است که به دلیل اجرای سقف‌ها، تغییر شکل‌ها به مقادیر ثبت شده محدود شده است. بنابراین می‌توان دریافت که این روش پایدارسازی گود، به دلیل اجرای دال‌های بتنی در تراز طبقات دارای عملکرد مناسبی در کنترل تغییرشکل است. همچنین به دلیل اجرا نشدن دال بتنی در دو تراز صفر و ۳- متر به منظور سهولت در انجام عملیات حفاری، مقادیر تغییرشکل در این ترازها بیش‌تر از سایر نقاط است. به همین دلیل می‌توان دریافت که مهار گود در ترازهای اولیه حفاری اهمیت ویژه‌ای دارد، چنان‌که با تغییر در توالی ساخت و تکمیل دال‌های در مجاور مقاطع پایش شده

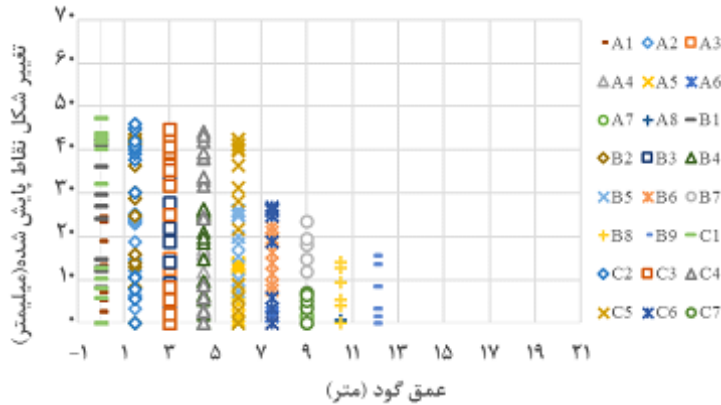
در ترازهای اولیه گود، کنترل تغییر شکل‌ها به مقادیر کم‌تر از ۴۷ میلی‌متر نیز امکان‌پذیر بود و تغییر شکل‌ها روند صعودی پیدا نمی‌کرد. به‌عنوان یک پیشنهاد توصیه می‌شود برای کنترل تغییر شکل‌ها در ترازهای اولیه گود و در صورت عدم اجرای سقف‌های سازه‌ای در ترازهای اولیه گود، طراحی در این ترازها محافظه کارانه‌تر در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال از مهارهای اضافی علاوه بر اجرای المان‌های سازه‌ای استفاده شود.

طبق شکل‌های ۷ و ۸ پروفیل تغییر شکل جانبی برای نقاط مختلف مقاطع (B) و (C) و در هر نوبت از پایش‌های میدانی در تاریخ‌های مختلف، ارائه شده است. بیش‌ترین مقادیر تغییر شکل افقی دیوار در مقاطع (B) و (C) به‌ترتیب برابر ۲/۱۶ و ۷/۲۱ میلی‌متر ثبت شده است. لازم به ذکر است به‌دلیل عملیات اجرایی پروژه، پایش‌های میدانی با محدودیت‌های مواجه شد، به این ترتیب که تغییر شکل‌ها در مقطع (B) تا تراز ۱۴- متری و در مقطع (C) تا تراز ۹- قرائت و ثبت شد.

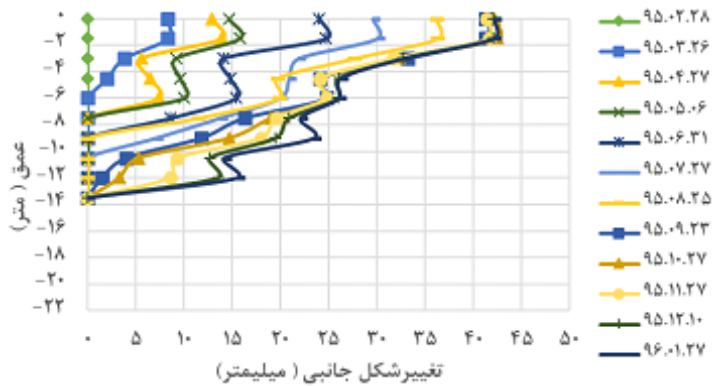
نتایج گراف‌ها نشان می‌دهد، پایدارسازی گود با استفاده از سیستم ساخت از بالا در این پروژه، جابه‌جایی‌های زمین را تا حد زیادی کنترل کرد. با وجود این، بر اساس شکل ۸، روند صعودی تغییر شکل‌ها در مقطع (C) مشاهده می‌شود. به‌طوری‌که با توجه به عملیات پایش مشخص شد طی مدت ۵۴ روز یک جهش در میزان تغییر شکل‌ها از ۱۳ میلی‌متر تا ۳۲ میلی‌متر رخ داده است. دلیل وقوع چنین جهشی را می‌توان نبود مهارهای کافی و اجرا نشدن سقف در ترازهای بالای دیوار، طی مدت زمان حفاری و همچنین اجرای دیوار بتنی در ترازهای بالاتر از سطح زمین بدون مهار مناسب در این مقطع، دانست.

نکته حائز اهمیت دیگر در این روش، استفاده از سقف به‌عنوان مهار متقابل برای تحمل فشار جانبی خاک است. بنابراین در صورت حذف سقف باید تیرها به اندازه کافی مقاومت داشته باشد. در گودبرداری‌های عمیق این موضوع به‌دلیل افزایش فشار جانبی خاک اهمیت بیش‌تری پیدا کرده و لزوم اجرای سقف به‌عنوان مهار متقابل بسیار حائز اهمیت است. با افزایش تغییر شکل‌های جانبی در وجه (C) تمهیداتی در اجرا جهت متوقف کردن روند تغییر شکل انجام شد. استفاده از مهارهای افقی و مورب به‌صورت خرپاهای بزرگ و هم‌چنین احداث رمپ پارکینگ با توجه به نقشه سازه و اجرای دال‌های بتنی در دهانه‌های شرقی و غربی این مقطع، باعث کاهش روند صعودی تغییر شکل شد. به این صورت که پس

از مسلح‌سازی مقطع تا پایان عملیات گود برداری، بیش‌ترین تغییر شکل گزارش شده در ترازهای مختلف دیوار این مقطع، تنها ۷/۳ میلی‌متر گزارش شد.



۶. تغییر شکل جانبی نقاط پایش شده درون گود



شکل ۷. نمودار تغییر شکل جانبی مقطع B در پایش‌های میدانی در تاریخ‌های مختلف

مطابق شکل ۹ با توجه به عمق نهایی گود در ۲۱- متری از تراز سطح زمین، با وجود افزایش مقادیر تغییر شکل در مقطع (C)، تمامی نقاط پایش شده دارای نسبت تغییر شکل جانبی بیشینه به عمق گود، در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۲۲ درصد و با میانگین ۰/۱۲ درصد، تا پایان عملیات حفاری بوده که این مقادیر با توجه به پژوهش‌های وانگ^۱ در محدوده مجاز است [۹]. با وجود این، افزایش جابه‌جایی‌های توده خاک این مقطع در طول ساخت، مطابق

1. Wang et al. (2010)

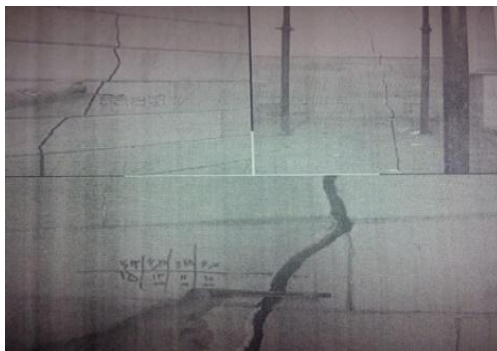
با شکل ۱۰ الف منجر به ترک خردگی ساختمان مجاور گود شد. در شکل ۱۰ ب مقطع (C) قبل از اصلاح روش ساخت و هم‌چنین نحوه نصب مهاری‌های اضافی در این مقطع برای کنترل تغییر شکل‌ها در شکل ۱۰ ج نشان داده شده است.



شکل ۸. نمودار تغییر شکل جانبی مقطع C در پایش‌های میدانی در تاریخ‌های مختلف



شکل ۹. تغییر شکل جانبی حداکثر برای نقاط داخل گود پس از اتمام عملیات حفاری





شکل ۱۰. الف) آسیب‌های وارده به ساختمان ۳ طبقه مجاور گود در مقطع C، ب) حفاری در مقطع C بدون نصب مهارهای کافی و افزایش روند صعودی تغییر شکل‌ها، ج) نصب مهارهای اضافی برای جلوگیری از افزایش تغییر شکل‌ها در مقطع C

مدل سازی عددی

۱. مشخصات مدل عددی

مدل‌سازی عددی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۱ انجام شد. مدل رفتاری خاک موهر-کولمب^۲ برای مدل‌سازی عددی، استفاده شده است. در مطالعات عددی با استفاده از تقارن‌های موجود در مسئله، تنها نیمی از گود در شرایط کرنش صفحه‌ای و به صورت دوبعدی مدل شده است. محدوده تأثیر گود در این مدل‌ها، بیش از محدوده متأثر از گودبرداری تعریف و شرایط مرزی در اطراف مدل اعمال شد. همچنین در تعریف شرایط مرزی، از جابه‌جایی جهت افقی در دو طرف مدل و همچنین جابه‌جایی دو جهت قائم و افقی در کف مدل، ممانعت به عمل آمد. مش‌بندی خاک ساختگاه، دیوار حائل، شمع‌های منفرد و فونداسیون با تکنیک استراکچر^۳ و المان‌های چهاروجهی انجام شد. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی شمع‌های منفرد ابعاد آن مطابق با مقادیر واقعی در پروژه انتخاب شد. همچنین در مناطقی که تغییر شکل آن‌ها حائز اهمیت است، مش‌بندی ریزتر اعمال شد. با

-
1. Abaqus
 2. Mohr-Culomb
 3. Structured

توجه به عملیات پایدارسازی گود به صورت مرحله‌ای، مدل‌سازی عددی در ۳۳ مرحله انجام شد. هم‌چنین اصطکاک بین خاک و دیوار صفر در نظر گرفته شد. به دلیل نصب مهارها و اجرای دیوار به صورت مرحله‌ای و هم‌چنین صلبیت محل اتصال آنها به یکدیگر، از دستور مرج^۱ برای اتصال اعضای مهار شامل تیرها و ستون‌ها با دیوار حائل استفاده شد. لازم به ذکر است سختی محوری سقف‌های بتنی با المان‌های فولادی معادل سازی شده است. برای ساده‌سازی آرایش پیچیده خرپاهای بزرگ در مقطع (C)، مهارها در مدل عددی این مقطع، به صورت منظم و با فواصل یک‌سان به سختی معادل تبدیل شد. هم‌چنین شمع‌های منفرد به صورت المان‌های مدفون^۲ در خاک مدل شد. لازم به ذکر است که محدوده تأثیر گود در جهت عمودی در مدل عددی ۲/۵ برابر عمق نهایی گود (۵۶ متر) و در جهت افقی ۳ برابر عمق گود (۷۰) متر در نظر گرفته شده است. شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه با توجه به گزارش‌های ژئوتکنیکی انجام شده در محل پروژه (مهندسین مشاور پی بنیان ایستا، ۱۳۹۳) تا عمق ۴۰- متری و در قالب ساختگاه‌های معرفی شده به وسیله بررسی‌های مترو خط (A)، در پنج لایه تعریف شد، لایه اول به ترتیب (QC-2) از تراز زمین تا تراز ۱۶- متر، لایه دوم (QC-1) از تراز ۱۶- متری تا کف گود، لایه سوم (Qf-2) به ضخامت ۱۰ متر تا تراز ۳۰- متری، لایه چهارم (QC-1) با ضخامت ۴ متر و در نهایت لایه پنجم (Qf-2) از تراز ۳۴- تا کف مدل تعریف شده است. در جدول ۳ جزییات روند مدل‌سازی عددی برای مقطع C بر اساس توالی ساخت در پروژه مذکور به اختصار ذکر شده است.

۲. تحلیل حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی

با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای سازه‌ای و هندسی گود در مدل عددی، تحلیل حساسیت روی پارامترهای ژئوتکنیکی شامل مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی لایه‌ها انجام شد. سایر پارامترها بر اساس مقادیر پیش فرض در نرم‌افزار برای مدل خاک موهر-کولمب در نظر گرفته شد. در این پژوهش آنالیز حساسیت با پردازش ۶۰ مدل عددی انجام شد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، با افزایش پارامترهای مدول الاستیسیته

1. Merge
2. Embedded

جدول ۳. مراحل محاسباتی در مدل عددی برای پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا در پروژه مقطع C

مرحله اول	استپ ۱-۳	اعمال بار، نصب ستون‌های سازه به همراه شمع کیسونی و اتصال قاب‌ها
مرحله دوم	استپ ۴-۵	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۴-
مرحله سوم	استپ ۶-۷	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۴-
مرحله چهارم	استپ ۸-۹	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۸-
مرحله پنجم	استپ ۱۰	اجرای دیوار تا تراز ۳/۵+ و نصب مهارتی افقی در تراز ۱/۵+
مرحله ششم	استپ ۱۱-۱۲	اجرای سقف تراز ۳/۵- و حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۸-
مرحله هفتم	استپ ۱۳-۱۴	اجرای سقف در تراز ۷- و حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱۲-
مرحله هشتم	استپ ۱۵-۱۶	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱۴-
مرحله نهم	استپ ۱۷	نصب مهارتی افقی در تراز ۳/۵- و نصب اولین یال خرابی بزرگ
مرحله دهم	استپ ۱۸	نصب مهارتی افقی در تراز ۷/۵- و تکمیل یال‌های خرابی بزرگ
مرحله یازدهم	استپ ۱۹	نصب مهارتی و اجرای سقف در تراز ۱۰/۵-
مرحله دوازدهم	استپ ۲۰-۲۱	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱۶-
مرحله سیزدهم	استپ ۲۲	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۱۴/۵-
مرحله چهاردهم	استپ ۲۳	نصب مهارتی و اجرای سقف در تراز ۱۴-
مرحله پانزدهم	استپ ۲۴-۲۵	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱۸-
مرحله شانزدهم	استپ ۲۶	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۱۷-
مرحله هفدهم	استپ ۲۷	نصب مهارتی و اجرای سقف در تراز ۱۷/۵-
مرحله هجدهم	استپ ۲۸	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۱۹-
مرحله نوزدهم	استپ ۲۸-۳۰	حفاری دهانه ابتدایی تا تراز ۲۱- و حفاری محل دیوار و احداث دیوار تراز ۲۱-
مرحله بیستم	استپ ۳۱-۳۴	ادامه حفاری دهانه‌ها تا تراز ۲۱- و اجرای فنداسیون به صورت مرحله‌ای

و زاویه اصطکاک داخلی برای لایه اول (ϕ_1 ، E_1) و مدول الاستیسته لایه سوم (E_3)، تغییر شکل جانبی کاهش پیدا کرد. هم‌چنین با افزایش چسبندگی لایه اول (C_1)، از مقدار صفر تا ۱۷ کیلو پاسکال، تغییر شکل جانبی کاهش یافت. اما با افزایش این مقدار از ۱۷ کیلو پاسکال برخلاف انتظار، تغییر شکل جانبی دارای روند صعودی شد.

مطابق نتایج آنالیز حساسیت، مشخص شد پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های دوم و سوم تأثیر ناچیزی بر تغییر شکل جانبی بیشینه دارند. علت این بی‌تأثیری را می‌توان به وجود بخش زیادی از عملیات خاکبرداری در لایه اول، که تا ارتفاع ۱۶ متری ادامه یافته، نسبت داد. با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت و بعد از چندین سعی و خطا در پردازش، مدل عددی با توجه به نتایج حاصل از پایش‌های میدانی، برای مقطع (B) تا یک‌صدمین روز از عملیات

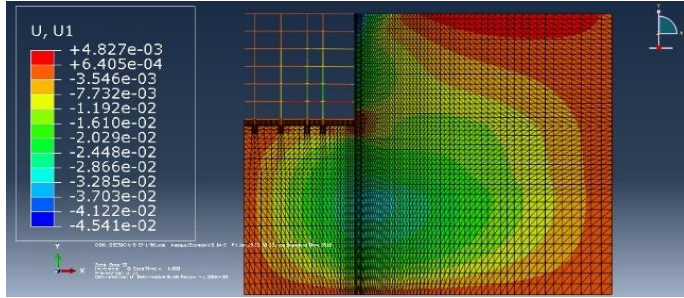
حفاری و پایدارسازی گود و با رسیدن تراز گود به عمق ۸- متر و برای مقطع (C) تا یک‌صد و پنجاهمین روز از عملیات حفاری و رسیدن تراز گود به عمق ۱۱- متر، کالیبره شد. مقادیر کالیبره شده پارامترهای ساختگاهی پروژه مطابق با جدول ۴ ارائه شد. در این جدول به ترتیب پارامترهای وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع لایه‌های خاک ارائه شده است. با کالیبره کردن مدل در این مرحله، امکان پیش‌بینی روند تغییر شکل‌ها تا انتهای عملیات حفاری و پایدارسازی گود در این پروژه فراهم شد.

مدل‌سازی عددی مقاطع (B) و (C) در شکل‌های ۱۱ الف و ۱۱ ب نشان داده شده است. هم‌چنین نمودارهای تغییر شکل جانبی حاصل از مدل‌سازی عددی، برای دو مقطع (B) و (C) در مراحل مختلف پایدارسازی در شکل‌های ۱۲ الف و ۱۲ ب ارائه شده است. بر این اساس، نمودارهای تغییر شکل جانبی حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج تغییر شکل حاصل از برداشت‌های میدانی منطبق شده تا امکان مقایسه نتایج مدل عددی با پایش‌های میدانی فراهم شود.

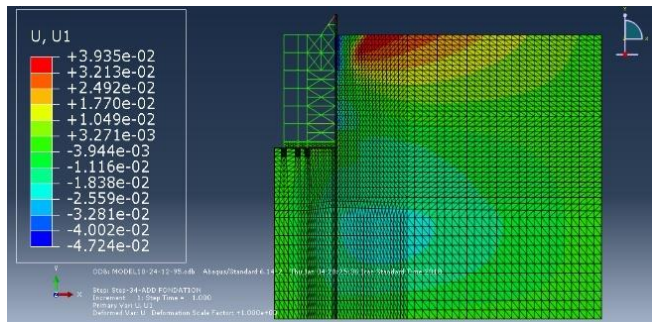
با مقایسه نتایج مشخص شد که تا پایان مراحل ساخت در هر مقطع، مقدار تغییر شکل بیشینه جانبی دیوار در مقطع (B) به ۴/۵۵ میلی‌متر و در مقطع (C) به ۷/۴۶ میلی‌متر رسید. این در شرایطی است که مطابق با نتایج حاصل از پایش‌های میدانی، بیشینه تغییر شکل جانبی دیوار تا پایان مراحل ساخت، برای مقاطع (B) و (C) به ترتیب ۱۶/۴۲ و ۲۱/۴۷ گزارش شده است. چنان‌که ذکر شد به دلیل اجرای سقف‌ها عملیات پایش با محدودیت‌هایی مواجه شد به این صورت که در مقطع A و B تا عمق ۱۴- متر و در مقطع C تا عمق ۹- متر، تغییر شکل‌های دیواره گود قرائت شد.

جدول ۴. پارامترهای کالیبره شده ساختگاهی در مدل‌سازی عددی گود

زویه اتساع (degree)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	چسبندگی (KN/m ²)	مدول الاستیسیته (KN/m ²)	وزن مخصوص خاک (KN/m ³)	ارتفاع لایه (متر)	لایه خاک
۰	۲۸	۱۰/۵	۲۴۰۰۰	۱/۷۵۰	۰-۱۶	لایه اول Qc-2
۲	۲۲	۲/۸۰	۲۸۰۰۰	۱/۶۵۰	۱۶-۲۲	لایه اول Qc-1
۰	۲۶	۱۳	۱۱۰۰۰	۱/۶۵۰	۲۲-۴۰	لایه اول Qf-2

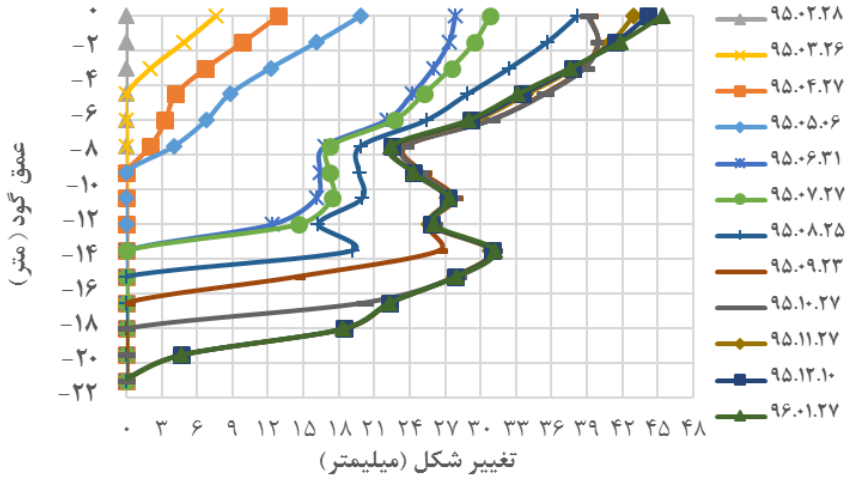


الف

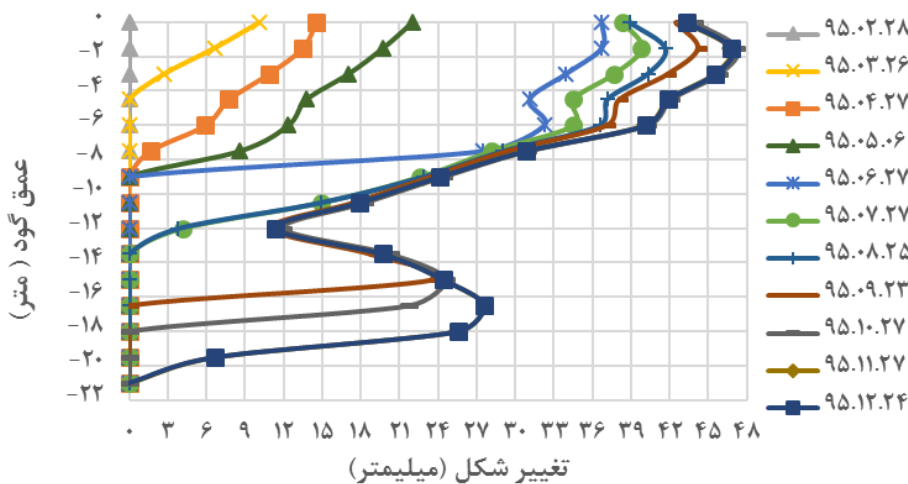


ب

شکل ۱۱. مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس الف) مقطع (B)، ب) مقطع (C)



الف



ب

شکل ۱۲. پیش‌بینی تغییر شکل جانبی دیوار بر اساس مدل عددی در مراحل مختلف حفاری و پایدارسازی گود، الف) مقطع B، ب) مقطع C

۳. تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف سیستم مهاری، در قالب چهار ساختگاه پیشنهادی در سال‌های اخیر با توجه به گسترش گودهای عمیق در محیط‌های شهری، معمولاً روش‌های مبتنی بر نیرو و معیار مناسبی برای طراحی نبوده است و استفاده از آن‌ها در محدوده ارتجاعی مصالح مناسب است. آیین‌نامه‌های جدید با توجه به اهمیت تغییرشکل‌ها در محیط‌های شهری، معیار جابه‌جایی را به‌عنوان شاخصی برای تعیین سطح پذیرش خسارت در نظر گرفته‌اند، زیرا عملکرد سیستم پایدارسازی گود در محیط‌های شهری، اهمیت زیادی داشته و گاهاً وجود مقادیر کوچک تغییرشکل منجر به عملکرد نامناسب سیستم مهاری می‌شود. به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم پایدارسازی گود به‌روش ساخت از بالا در چهار ساختگاه ذکر شده، تحلیل حساسیت اجزای سیستم مهاری به‌صورت جداگانه در هر ساختگاه بررسی شد. در این زمینه پارامترهای ممان اینرسی واحد طول دیوار (I)، مدول الاستیسیته دیوار (E)، فاصله قائم و افقی مهاری‌ها (Sv) و (Sh)، عرض گود (W)، طول شمع منفرد ستون (T)، عرض دهانه قاب‌های مهاری (Sp)، عمق گود (H) و عمق نفوذ دیوار حائل (D) به‌صورت متغیر در نظر گرفته شده و مقادیر اولیه این پارامترها برای متغیرهای سازه‌ای مطابق

جدول ۵، برابر با مقادیر واقعی موجود در پروژه بررسی شده لحاظ شدند. هم‌چنین لازم به ذکر است که توالی ساخت در مدل‌های عددی، مطابق توالی ساخت در پروژه میدانی در نظر گرفته شد.

جدول ۵. متغیرهای اولیه سازه‌ای برای تحلیل حساسیت

پارامترهای سیستم مهاری	ممان اینرسی دیوار I(m ⁴ /m)	مدول الاستیسته دیوار E(Mpa)	فاصله افقی مهاری‌ها Sh(m)	فاصله قائم مهاری‌ها Sv(m)	عرض گود w(m)	سربار Q(kpa)	طول شمع منفرد T(m)	عمق نفوذ دیوار D(m)	عرض دهانه قابها Sp	عمق گود H(m)
مقدار	۰۰۰۵۳	۲۵۰۰۰	۵	۵/۳	۱۷	۰	۲	۲	۵	۲۱

به منظور بررسی پارامتریک، ویژگی‌های سازه‌ای در چهار ساختگاه ذکر شده، به صورت متغیر در نظر گرفته شد. برای متغیر قرار دادن ممان اینرسی دیوار، باید دیوار حائل بتنی را با ضخامت‌های مختلف، در نظر گرفت. برای این منظور مقادیر ضخامت دیوار برابر ۲۵، ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ سانتی متر انتخاب شد. هم‌چنین مقدار سختی خمشی دیوار هم با اعمال ضرایب ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ به صورت متغیر در نظر گرفته شد. برای تعیین تأثیر فواصل قائم مهاری‌ها، مقادیر ۳/۵، ۴، ۵ متر انتخاب و هم‌چنین برای تعیین تأثیر فاصله افقی مهاری‌ها، در هر یک از شرایط ساختگاهی، مقادیر ۳/۷۵، ۵، ۶/۲۵ و ۷ متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است به دلیل شبیه‌سازی مدل عددی به صورت دوبعدی، اثر فواصل افقی مهاری‌ها معادل با سختی محوری مهاری‌ها، تعریف شد. هم‌چنین مقادیر عرض دهانه قاب‌های سیستم مهاری ۳، ۴، ۵ و ۷ متر به عنوان متغیر لحاظ شد. داده‌های به دست آمده متشکل از ۲۲ مدل عددی در دو تراز ۱۰- و ۲۱- در هر یک از شرایط ساختگاهی، برای آنالیز حساسیت، استفاده شد. در نهایت برای هر ساختگاه تعداد ۴۴ داده موجود است که امکان تعیین سختی سیستم مهاری بر اساس کنترل تغییر شکل را فراهم می‌کند.

مطابق جدول ۶ اهمیت نسبی مقادیر مختلف پارامترهای سازه‌ای سیستم مهاری در تعیین تغییر شکل دیواره گود بیان شده است. لازم به ذکر است که شیب حاصل از نمودار تغییر شکل به ازای مقادیر مختلف هر یک از پارامترها، بیانگر اهمیت نسبی پارامتر مذکور بر روند

تغییر شکل‌ها است، هم‌چنین باید همه پارامترها در یک مقیاس باشند تا امکان مقایسه اهمیت نسبی آنها با یک‌دیگر فراهم شود.

جدول 6. اهمیت نسبی پارامترهای سازه‌ای در هر یک از شرایط ساختگاهی

نوع پارامتر سازه‌ای	درصد اهمیت نسبی پارامترهای سازه‌ای در شرایط ساختگاهی مختلف			
	Qc-1	Qc-2	Qf-1	Qf-2
I	9/34	6/53	8/71	6/42
E	7/89	3/59	6/1	4/13
Sh	11/1	5/73	8/52	7/55
Sv	15/95	8/17	12/4	11/47
W	10/42	2/4	4/31	3/78
T	3/33	1/71	3/22	3/95
Sp	5/75	2/14	3/13	2/09
D	2/6	0/03	0/65	0/34

به‌طورکلی مطابق جدول 6 نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی و سازه‌ای سیستم مهاری نشان می‌دهد که فاصله قائم و افقی مهاری‌ها و ممان اینرسی و مدول الاستیسیته دیوار، به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر و عرض دهانه‌ها، عرض گود، طول شمع و عمق مدفون دیوار به‌ترتیب کم‌ترین تأثیر را در تعیین تغییر شکل جانبی گود دارند.

بر اساس آنالیز حساسیت، افزایش مقادیر فواصل قائم و افقی مهارهای جانبی، باعث افزایش مقادیر تغییر شکل جانبی می‌شود. لازم بذکر است در ساختگاه (Qc-1) بر خلاف ساختگاه‌های دیگر، افزایش عرض گود همواره با افزایش تغییر شکل جانبی همراه شد با این وجود، افزایش عرض گود در سایر شرایط ساختگاهی تأثیر چندانی بر خروجی تغییر شکل‌ها نداشت. با افزایش مقادیر ممان اینرسی و سختی خمشی دیوار، تغییر شکل‌ها کاهش یافته اما بر اساس نتایج مشخص شد که در ساختگاه‌های (Qc-2) و (Qf-2) به‌دلیل پایداری ذاتی خاک، با افزایش مقادیر این دو پارامتر بیش از یک حد معین، تغییر شکل جانبی بدون تغییر باقی ماند، به‌عبارت دیگر افزایش سختی و ممان اینرسی دیوار بیش از یک حد معین هیچ

تأثیری در کنترل تغییر شکل جانبی دیوار ندارد. تأثیر عرض دهانه‌ها در نسبت تغییر شکل جانبی ماکزیمم به عمق گود نشان می‌دهد، با وجود تأثیر کم تغییرات این پارامتر روی تغییر شکل جانبی، به‌ازای یک مقدار بهینه از عرض دهانه، تغییر شکل جانبی دیوار گود به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. هم‌چنین تأثیر تغییرات عرض دهانه‌ها بر تغییر شکل جانبی بیشینه در ساختگاه (QC-1) روندی کاهشی داشته ولی در سایر شرایط ساختگاهی تقریباً ثابت ماند. با افزایش طول شمع کیسونی و عمق مدفون دیوار، مقادیر تغییر شکل جانبی دیوار کاهش پیدا کرده که مانند عرض دهانه، تأثیر ناچیزی بر خروجی تغییر شکل جانبی دارد.

4. تعیین سختی سیستم مهاری بر اساس تغییر شکل، در ساختگاه‌های پیشنهادی

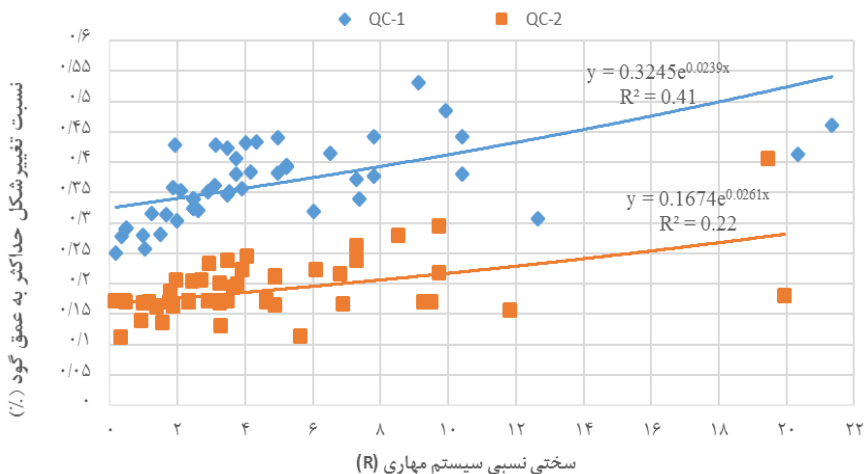
بر اساس نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای سازه‌ای و هندسی در هر چهار ساختگاه، مشخص شد که ساختگاه (QC-2) به‌دلیل پایداری ذاتی، کم‌ترین تأثیرپذیری را از تغییرات پارامترهای سازه‌ای دارد. چنان‌که قبلاً ذکر شد، در پژوهش‌های بریسون و زاپاتا¹ از پارامتری به‌نام سختی نسبی (R) به منظور ایجاد ارتباط بین بیشینه تغییر شکل جانبی دیوار و سختی سیستم مهاری مورد نیاز استفاده شد. پارامتر سختی نسبی، یک پارامتر بدون بعد است که سختی خاک را به سختی سیستم مهاری مرتبط می‌سازد. مقادیر کم (R) نشان‌دهنده سیستم مهاری صلب و مقادیر بزرگ تر از آن نشان‌دهنده سیستم انعطاف‌پذیر است. در این پژوهش پارامترهای طول شمع کیسونی، عرض گود، عرض دهانه و عمق مدفون دیوار نیز در تعریف سختی نسبی سیستم مهاری (R) وارد شد. بر اساس رابطه (۲) پارامتر سختی نسبی بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$R = \frac{E_s}{E} * \frac{Sh * Sv * H}{I} * \frac{SP}{WTD} \quad (2)$$

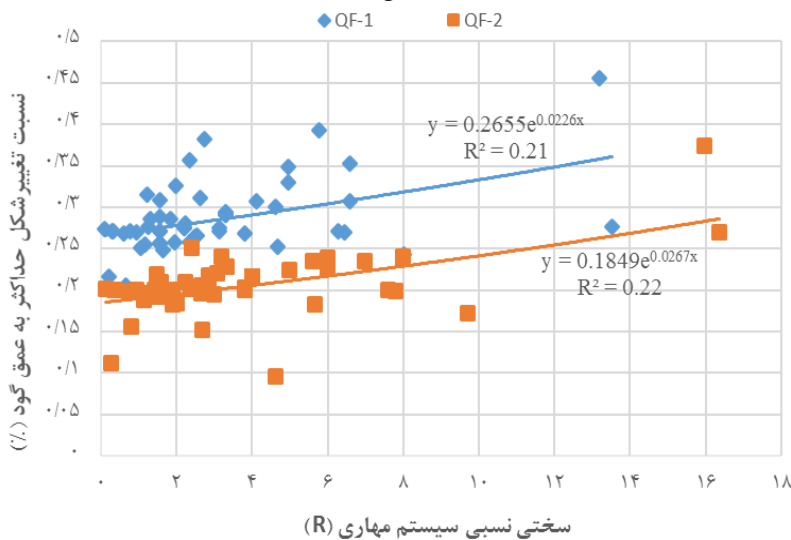
پارامترهای (Es)، (E)، (Sh)، (Sv)، (H)، (I)، (Sp)، (W)، (T)، (D) به‌ترتیب مدول سختی خاک، مدول الاستیسیته دیوار، فاصله افقی مهاری‌ها، فاصله قائم مهاری‌ها، ارتفاع گود، ممان اینرسی دیوار در واحد طول، عرض دهانه قاب‌های مهاری، عرض گود، طول شمع‌های منفرد و عمق مدفون دیوار است. بر این اساس، مجموعاً ۱۶۰ مدل عددی تعریف و نتایج آن

1. Brason and Zapata(2012)

تحلیل شد. نسبت تغییر شکل بیشینه ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی، برای ساختگاه‌های (QC) و (QF) در شکل‌های 13 الف) و ب) نشان داده شده است.



شکل 13. الف) نسبت تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه‌های (QC)



شکل 13. ب) نسبت تغییر شکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه‌های (QF)

مطابق نمودارها مشخص می‌شود نسبت تغییر شکل بیشینه به عمق گود در دو ساختگاه

(QC-2) و (QF-2) بین محدوده ۰/۱ و ۰/۲ است که گواه عملکرد مناسب روش پایدارسازی ساخت از بالا در دو ساختگاه مذکور است. هم‌چنین در دو ساختگاه (QC-1) و (QF-1) با وجود پراکندگی در برخی داده‌ها مشخص شد، که نسبت تغییرشکل جانبی بیشینه به عمق گود برای ساختگاه (QF-1) بین محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۳ و برای ساختگاه (QC-1) بین محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۴ است. بنابراین می‌توان با تغییر در توالی ساخت و یا تغییر در سیستم مهاری، عملکرد این سیستم در ساختگاه (QC-1) متشکل از شن ماسه‌دار با درصد ریزدانه پایین را بهبود بخشید. روابط تجربی (۳) تا (۶) تغییر شکل بیشینه ایجاد شده را به ترتیب برای ساختگاه‌های (QC-1)، (QC-2)، (QF-1) و (QF-2) به سختی نسبی مرتبط می‌سازد.

بر اساس بررسی بریسون و زاپاتا برای چنین معادلاتی از روابط نمایی استفاده شده است:

$$\delta h_{\max}/H\% = 0.3245e^{0.0239R} \quad \text{(۳) ساختگاه (QC-1)}$$

$$\delta h_{\max}/H\% = 0.1674e^{0.0261R} \quad \text{(۴) ساختگاه (QC-2)}$$

$$\delta h_{\max} - H\% = 0.2655e^{0.0226R} \quad \text{(۵) ساختگاه (QF-1)}$$

$$\delta h_{\max} - H\% = 0.1849e^{0.0267R} \quad \text{(۶) ساختگاه (QF-2)}$$

لازم به ذکر است با توجه به اهمیت توالی ساخت در نتایج مدل سازی عددی، روند ساخت در گراف‌های ارائه شده به این صورت است که حفاری تا یک متر پایین‌تر از مهاری‌ها انجام شده و سپس مهاری‌ها نصب می‌شود. بنابراین، توجه به این نکته ضروری است که برای استفاده از نتایج این پژوهش، باید توالی ساخت در مدل‌های عددی لزوماً در چهارچوب روش ساخت در این پروژه، تعریف شود. مطابق نتایج، روابط ارائه شده در چهار ساختگاه ذکر شده، سختی مورد نیاز سیستم مهاری را با دقت نسبتاً مناسبی به تغییر شکل جانبی بیشینه دیواره گود مرتبط می‌سازد، بنابراین با وجود روابط ارائه شده برای هر ساختگاه، می‌توان اقدام به طراحی سیستم مهاری براساس کنترل تغییر شکل در محدوده مجاز کرد. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش در حفاری و پایدارسازی گودهای واقع در محدوده بررسی شده ایستگاه‌های خط (A) مترو قم و سایر مناطقی که در یکی از چهار شرایط ساختگاهی واقع شده‌اند، کاربرد دارد. هم‌چنین با توجه به جدید بودن این روش در کشور و نبود آیین‌نامه طراحی و اجرا برای این روش، انجام بررسی‌های این چنین می‌تواند به

طراحان یک دید کلی از عملکرد این روش از دیدگاه تغییر شکل در ساختگاه‌های مختلف و هم‌چنین امکان یک تخمین کلی از سختی سیستم مهاری بر اساس مقادیر تغییر شکل مجاز را فراهم کند.

نتیجه‌گیری

چنان‌که ذکر شد، با توجه به پژوهش‌های انجام شده خط (A) مترو قم و گزارش‌های ژئوتکنیکی محل، شرایط ساختگاهی پروژه پایدارسازی گود به چهار نوع واحد خاکی تفکیک شد. در ترازهای نزدیک به سطح زمین، واحد (QC-2) و در ترازهای پایین‌تر، واحدهای (QC-1) و (QF-2) در نظر گرفته شد. پایدارسازی گود در این پژوهش به روش ساخت از بالا و بر اساس ساخت مشاهده‌ای انجام شد. عملیات ابزارسنجی و رفتارنگاری گود نیز با استفاده از دوربین توتال استیشن انجام شد. در ادامه به‌منظور پیش‌بینی روند تغییر شکل‌ها، مدل‌سازی گود در نرم افزار آباکوس و در محیط دوبعدی شبیه‌سازی شد. نتایج پژوهش به اختصار عبارتند از:

۱. مطابق با عملیات پایش، تغییر شکل جانبی بیشینه در دو مقطع مهم پروژه مذکور (B و C) تا انتهای عملیات پایدارسازی گود، به ترتیب $42/16$ و $47/21$ میلی‌متر ثبت شد. هم‌چنین تغییر شکل سایر نقاط درون گود کم‌تر از 30 میلی‌متر گزارش شد.
۲. عدم تکمیل قاب‌های ساختمانی و دال‌های بتنی در مقطع (C) به‌منظور سهولت در عملیات خاک‌برداری و هم‌چنین وجود چاه‌های جذبی، منجر به افزایش تغییر شکل‌ها در این مقطع شد. از این‌رو، با تغییر در توالی ساخت و عملیات حفاری، روند صعودی تغییر شکل‌ها کنترل شد.
۳. با وجود افزایش مقادیر تغییر شکل در مقطع (C) و هم‌چنین عمق نهایی گود تا تراز -21 متری، نسبت تغییر شکل جانبی بیشینه به عمق گود برای تمامی نقاط مورد پایش تا پایان عملیات حفاری، در محدوده $0/02$ تا $0/22$ درصد و با میانگین $0/12$ درصد، محاسبه شد که این مقادیر با پژوهش‌های وانگ مطابقت دارد.
۴. براساس تحلیل حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی به‌منظور دستیابی به مدل عددی کالیبره شده مشخص شد، پارامترهای ژئوتکنیکی لایه اول ساختگاه پروژه بیش‌ترین تأثیر را بر

- تغییر شکل جانبی دارند. علت این تأثیر را می‌توان به وجود بخش زیادی از عملیات خاکبرداری در لایه اول، که تا ارتفاع ۱۶ متری ادامه یافته، نسبت داد.
۵. بر اساس پیش‌بینی مدل عددی کالیبره شده در مقطع (C)، در صورت تداوم فرآیند حفاری و ساخت با روش اولیه، تغییر شکل جانبی دیوار در این مقطع تا پایان عملیات حفاری به ۶۷/۵ میلی‌متر می‌رسید.
۶. با توجه به وقوع تغییر شکل‌های جانبی حداکثر در ترازهای بالای گود در مقاطع پایش شده می‌توان دریافت در این روش، مهار گود در تراز نزدیک به سطح زمین اهمیت ویژه‌ای دارد. از این‌رو، تکمیل نشدن قاب‌های سازه‌ای و دال‌ها به‌منظور سهولت در عملیات حفاری، می‌تواند منجر به افزایش تغییر شکل‌ها شود.
۷. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی و سازه‌ای سیستم مهاری در ۱۶۰ مدل عددی نشان می‌دهد که فاصله قائم و افقی مهاری‌ها و ممان اینرسی و مدول الاستیسیته دیوار، به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در تعیین تغییر شکل جانبی حداکثر گود دارند.
۸. پارامتر سختی نسبی پیشنهادی در بررسی بریسون و زاپاتا، با اضافه شدن پارامترهای طول شمع کیسونی، عرض گود، عرض دهانه قاب‌ها و عمق مدفون دیوار، مجدداً تعریف شد. بر این اساس، سختی سیستم مهاری با توجه به مقادیر مجاز تغییر شکل و با استفاده از ۴ رابطه‌ی نمایی برای هر یک از ۴ ساختگاه پیشنهادی قابل تخمین است.
۹. مطابق با نتایج گراف‌ها، روش ساخت از بالا در ساختگاه‌های QC-2 و QF-2، دارای عملکرد مطلوب‌تری از دیدگاه کنترل تغییر شکل، نسبت به دو ساختگاه QC-1 و QF-1 است.

تقدیر

از مجری محترم پایدارسازی پروژه گود برداری "مجتمع تجاری سلام" که فرصت انجام بررسی‌ها و برداشت‌های میدانی، برای انجام این پژوهش را فراهم کردند تقدیر و تشکر می‌کنیم.

منابع

1. Finno R. J., "Use of monitoring data to update performance predictions of supported excavation", Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Boston, (2007) 1-30.

2. OSHA "Excavation: construction safety and health outreach program", Occupational Safety & Health Administration-Home Accessed, April 19 (2013).
۳. بازاریار م. ح.، "دینامیک خاک"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ دوم، تهران، ایران (۱۳۹۲).
4. Luo Y., Chen J., Xi W., Zhao P., Qiao X., Deng X., Liu Q., "Analysis of tunnel displacement accuracy with total station", *Measurement*, 83 (2016) 29-37.
5. Tan Y., Zhu H., Peng F., Karlsrud K., Wei, B., "Characterization of semi-top-down excavation for subway station in Shanghai soft ground", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 68 (2017) 244-261.
6. Clough G. W., O'Rourke T. D., "Construction induced movements of in situ walls", In *Proceeding Design and performance of Earth Retaining Structures*, ASCE Special Conference, Ithaca, New York (1990) 439-470.
7. Kung G. T., Juang C. H., Hsiao E. C., Hashash Y. M., "Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6) (2007) 731-747.
8. Teng F., "A Simplified Expression for Ground Movements Induced by Excavations in Soft Clay", In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering*, Singapore, (2018) 93-115.
9. Wang J. H., Xu Z. H., Wang W. D., "Wall and ground movement due to deep excavations in Shanghai soft soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 136, No. 7, (2010) 985-994.

10. Long M., "Database for retaining wall and ground movements due to deep excavation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 127, (2001) 203-224.
11. Finno R. J., Blackburn J. T., "Automated monitoring of supported excavation. Proceedings, 13th Great Lakes Geotechnical and Geoenvironmental Conference", *Geotechnical Applications for Transportation Infrastructure*, GPP 3, Milwaukee, (2005) 1-12.
12. Finno R. J., Tu X., "Selected topics in numerical simulation of supported excavations. International Conference of Numerical Modeling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, Bochum, Germany, (2006) 3-20.
13. Yang Song-lin, "LIU Wei-ning, Wang Meng-shu, Hung Fang, CUI Nianzhi (2004)", *Study on the Auto-total Station System for Monitoring Analyzing and Forecasting Tunnel Country Rock Deformation. Journal of The China Railway Society*, Volume 3 (2004) 93-97.
۱۴. شیرغلامی و،، خداپرست م.، "ابزارسنجی و ارزیابی تغییر شکل درپایدارسازی گود به روش ساخت از بالا (Top-Down) به همراه مطالعه موردی"، پنجمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی تهران (۱۳۹۶)، ۵-۱۲.
15. Li M. G., Chen J. J., Xu A. J., Xia X. H., Wang J. H., "Case study of innovative Top-Down construction method with channel-type excavation", *Journal of Construction Engineering and Management*, (2014) 140.
16. Paek J. H., Ock J. H., "Innovative building construction technique: Modified Up-Down method", *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 122, No. 2, (1996) 141-146.
17. Wang J. H., Xu Z. H., Di G. E., Wang W. D., "Performance of a deep excavation constructed using the united method: Bottom-Up method in the main building part and Top-Down method in the annex building

- part", International Conference of Underground Construction and Ground Movement, Shanghai, China, (2006) 385-392.
18. Hong W. K., Kim J. M., Lee H. C., Park S. C., Lee S. G., Kim S. I. "Modularized top-down construction technique using suspended pour forms (modularized RC system downward, MRSD)", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19 (7) (2010) 802-822.
19. Lim A, Ou CY, "Hsieh PG. Investigation of the integrated retaining system to limit deformations induced by deep excavation", Acta Geotechnica. 2018 Aug 1, 13 (4) (?) 973-95.
20. Bryson L. S., Zapata-Medina D. G., "Direct Approach for Designing an Excavation Support System to Limit Ground Movements", In Earth Retention Conference 3, Washington, (2010) 154-161.
21. Bryson L. S., Zapata-Medina D. G., "Method for estimating system stiffness for excavation support walls", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138 (9) (2011) 1104-1115.
۲۲. مؤسسه مهندسی مشاور ساحل، "خدمات مهندسی پروژه مترو قم خط - A"، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل SCE 2000 UNGR TUN EG RP-B0 (۱۳۹۰).
۲۳. مهندسی مشاور پی بنیان ایستا، "گزارش مطالعات ژئوتکنیک پروژه مجتمع تجاری ساداتی (سلام)"، ۸۸۲۷/۱ (۱۳۹۰) ۸۸۲۶.
24. Leica Geosystems, "Leica FlexLine TS02/TS06/TS09 user manual", Leica Geosystems AG, Heinrich-Wild-Strasse, CH-9435 Heerbrugg, Switzerland, www.leica-geosystems.com (2008).
۲۵. قربانی ا.، خدایپرست م.، "طراحی پایدارسازی گود به روش Top-Down بر اساس سطح عملکرد مبتنی بر کنترل تغییرشکل با استفاده از مطالعات عددی و میدانی"، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه قم، ایران (۱۳۹۵).
۲۶. شیرغلامی و.، خدایپرست م.، "ارزیابی پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا در کنترل تغییر شکل دیواره‌های گود بر اساس مطالعات عددی و میدانی (مطالعه موردی)"، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه قم، ایران (۱۳۹۷).