ارزیابی پایدارسازی گود به‌روش ساخت از بالا در کنترل تغییر شکل دیواره‌های گود بر اساس بررسی‌های عددی و میدانی

وحید شیرغلامی، مهدی خداپرست*، ابوالقاسم معزی؛
دانشگاه قم، دانشکدهٔ فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ٩٨/٠٣/٠٤ پذیرش ٩٨/١١/١٥

چکیده

جابه‌جایی زمین ناشی از حفاری در محدودهٔ شهری، همواره با چالش‌های جدی از دیدگاه ژئوتکنیکی و سازه‌ای مواجه بوده است. در این زمینه آسیب دیدگی ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور گود به‌دلیل تجاوز مقادیر تغییر شکل زمین از محدوده مجاز، خسارات جبران ناپذیری را به‌همراه دارد. بنابراین پیش‌بینی حرکت زمین مجاور گود در طراحی‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد و طراحی سیستم مهاری گود، کنترل تغییرشکل جانبی دیوارهٔ گود و نشست سطح زمین امری اجتناب‌ناپذیر است. این پژوهش، به بررسی پایدارسازی گود از دیدگاه تغییرشکل با استفاده از سازهٔ اصلی به‌روش ساخت از بالا و بر اساس پروژه‌ای واقعی می‌پردازد. برای این منظور، مراحل اجرا در روش ساخت از بالا به‌صورت 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 پایدارسازی گود با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس[1] انجام شده و به‌منظور صحت سنجی و پیش‌بینی روند تغییرشکل‌ها، کالیبراسیون مدل عددی بر اساس نتایج حاصل از پایش‌های میدانی صورت پذیرفته است. در ادامه پارامترهای مختلف سیستم مهاری به‌منظور بررسی عملکردی، متغیر در نظر گرفته شده و در نهایت با استفاده از ١٦٠ مدل عددی، امکان تخمین سختی مورد نیاز سیستم مهاری با توجه به تغییرشکل مجاز، در ٤ 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 تغییرشکل

*نویسنده مسئول khodaparast@qom.ac.ir

1. ABAQUS

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

مقدمه

یکی از نگرانی‌های اصلی در حفاری سازه‌های زیرزمینی، اثرات ناشی از حرکت زمین بر روی سازه‌های مجاور است. در محیط‌های شهری، جابه‌جایی تودهٔ خاک اطراف گود ناشی از تغییر وضعیت تنش‌ها، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای بررسی عملکرد سازه‌های نگهبان احداث شده است و با وجود ساخت و سازهای فراوان در مناطق شهری به‌ندرت 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 مهاری گود، ممکن است پیش‌بینی مناسبی از تغییرمکان‌ها ارائه ندهند، زیرا در برخی موارد وجود مقادیر کوچک تغییرشکل منجر به عملکرد نامناسب سیستم مهاری می‌شود. بر این اساس، مطابق با آیین‌نامه‌های جدید مانند آیین‌نامهٔ 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 نگهبان و مدل‌سازی عددی صحیح است. در روش‌های متداول حفاری‌های عمیق، روش ساخت از بالا[1] دارای برتری‌هایی نسبت به‌روش‌های سازهٔ نگهبان خرپایی، نیلینگ و انکراژ و غیره است. در پایدارسازی گود به‌شیوهٔ 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 نگهبان نیز عمل کرده و منجر به کاهش استفاده از مهاری‌های موقت می‌شود [٤]. هم‌چنین از دیگر ویژگی‌های پایدارسازی و اجرای گود با تکنیک ساخت از بالا، فراهم کردن شرایط لازم برای احداث سازه در فضاهای محدود

1. Top-Down

و یا پرتردد 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 به‌صورت 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 به‌سمت پایین و تا عمق مورد نظر، جهت اجرای سقف در ترازهای پایین و تکمیل دیوارهای حائل پیرامونی، ادامه می‌یابد. هم‌چنین هم‌زمان با پیش‌روی حفاری به‌سمت 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 به‌روش 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 به‌روش ساخت از بالا واقع در محدودهٔ 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 به‌منظور 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 به‌صورت روابط نمایی در قالب چهار ساختگاه پیشنهادی مطابق با بررسی‌های خط (A) مترو قم، ارائه می‌شود.

تحقیقات پیشین

پژوهش‌های تجربی و ساده‌سازی‌های کلاف[1] و کانگ[2] 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 به‌منظور مقایسه و اطمینان از نتایج مدل عددی

1. Clough & O'Rourke
2. Kung

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

ضروری است [٦]، [٧]. هم‌چنین براساس مطالعه تنگ[1]، معمولاً شبیه‌سازی خاک‌ها با خاصیت غیر ایزوتروپ، منجر به افزایش دقت در پیش‌بینی پروفیل نشست می‌شود. به همین منظور پارامتر سختی غیرایزوتروپیک برای خاک به‌صورت نسبت مدول برشی در صفحه قائم به مدول برشی در صفحه افقی تعریف شد [٨].

مطابق با پژوهش وانگ[2] و همکاران (٢٠١٠)، رابطهٔ بین تغییر شکل جانبی بیشینهٔ دیوار در برابر سختی سیستم و ضریب اطمینان در برابر بالا آمدگی کف، در زمین‌هایی رسی نرم بررسی شد [٩]. نتایج نشان داد، نشست بیشینهٔ زمین مجاورگود برای ٣٠٠ مورد بررسی شده، در محدودهٔ ٠/١٪ تا ٠/٨٪ و با مقدار میانگین ٠/٤٢٪ از عمق نهایی گود است که این مقادیر متناظر با پژوهش‌های لانگ[3] برای زمین‌های حاوی خاک نرم با ضخامت بیش از H ٠/٦ و با بستر سخت در کف گود است[١٠]. هم‌چنین مشخص شد، حفاری به‌شیوهٔ ساخت از بالا در پژوهش وانگ، با کم‌ترین میزان تغییر شکل بیشینه جانبی همراه است (متوسط برابر با ٠/٢٧٪ 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 برچسبی ابزاری 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 [١١]. هم‌چنین استفاده از زاویه‌سنج‌ها[4] یکی از ابزارهای مفید برای پایش گود است. مطابق پژوهش‌های فینو[5] زاویهٔ سنج‌ها، ابزار کاربردی برای پایش نشست زمین در نقاط مختلف گود است [١٢]. پژوهش‌های مشابهی به‌وسیلهٔ یانگ[6] با استفاده از دوربین توتال استیشن خودکار انجام شد که در آن دقت روش ٠/٨ میلی‌متر محاسبه شد. در سال‌های اخیر نیز روش اندازه‌گیری از راه دور RDM با استفاده از دوربین‌های معمولی و با دقت ٠/٤ تا ٠/٧ میلی‌متر، پیشنهاد شد [١٣]، [١٤].

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

محققان مختلف در سال‌های اخیر به‌دنبال 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 به‌دنبال 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 به‌منظور عمل‌آوری بتن به‌وسیلهٔ هانگ[1] استفاده شد. [۱۸]. هم‌چنین استفاده از سیستم یک‌پارچه شامل دیوارهای پشت بنددار به‌همراه دیوارحائل برای کنترل تغییرشکل گود عمیق با روش ساخت از بالا به‌وسیلهٔ لیم و هسیه[2] 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 به‌روش ساخت از بالا در ساختگاه‌های رسی نرم نشان می‌دهد که سختی سیستم مهاری نقشی اساسی در عملکرد این روش ایفا کرده و از سوی دیگر با زمان‌بر بودن عملیات اجرایی در گودهای بزرگ مواجه است. به‌همین دلیل تغییر شکل‌های جانبی و نشست سطح زمین به زمان وابسته می‌شود. هم‌چنین انجام عملیات حفاری به‌صورت مرحله‌ای و اجرای دال‌های بتنی در جاریز سبب کاهش پدیدهٔ تورم و بالاآمدگی خاک ناشی از باربرداری در تراز نهایی کف گود می‌شود [۵].

بریسون و زاپاتا[3] (۲۰۱۰) نشان دادند که سختی دیوارحائل به‌عنوان بخشی از سیستم مهاری گود، در خاک رسی نرم و متوسط نقش برجسته‌ای را ایفا می‌کند. استفاده از ورق فولادی سخت‌تر به‌عنوان 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 مهاری داشته و برای سیستم‌هایی که دارای سختی کم‌تر از ۲۵۰ هستند نقش تعیین کننده‌ای در عملکرد کلی سیستم مهاری ایفا می‌کند. سال (۲۰۱۲) پارامتری بدون بعد

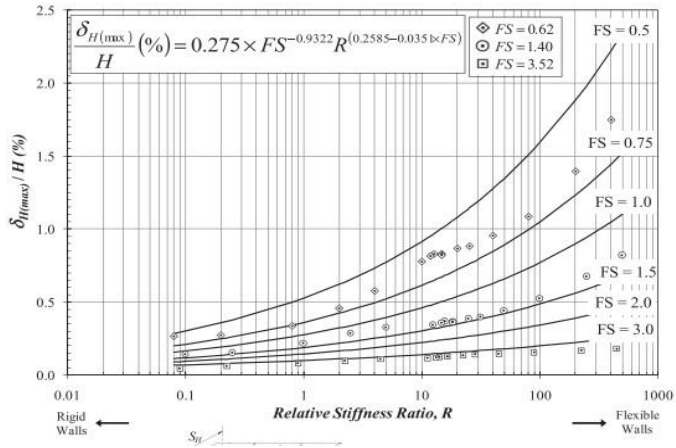
1. Hong
2. Lim & Hsieh
3. Brayson and Zpata

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

با عنوان سختی نسبی سیستم مهاری (R) به‌وسیلهٔ بریسون و زاپاتا معرفی شد. مطابق با رابطهٔ (١)، سختی نسبی سیستم مهاری در حفاری گود با استفاده از بررسی‌های عددی سه‌بعدی و مطالعات پارامتری معرفی شده است [٢٠]، [٢١].

$$R = \frac{Es}{E} * \frac{Sh*Sv*H}{I} * \frac{\gamma s*He}{Su} \qquad (١)$$

در این رابطه (Es) مدول الاستیسیته خاک، (E) مدول الاستیسیته دیوار، (Sh) و (Sv) به‌ترتیب 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، جملهٔ دوم بیان‌گر مشخصات المان‌های مهاری و دیوار حائل و جمله سوم بیان‌گر عدد پایداری گود است که مطابق با پژوهش‌های پک[1] شرایط خاک را بیان می‌کند. مقادیر کوچک (R) نشان‌دهندهٔ دیوارهای سخت مانند دیوارهای دیافراگمی است و مقادیر بزرگ‌تر آن، بیان‌گر دیوارهای انعطاف‌پذیر مانند ورق‌های فولادی است. شکل ١ بیش‌ترین تغییر شکل جانبی ثبت شده در انتهای حفاری را در برابر سختی نسبی سیستم مهاری و ضریب اطمینان در برابر بالاآمدگی، 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 ١. تغییر شکل جانبی بر اساس سختی نسبی سیستم مهاری و ضریب اطمینان در برابر بالا آمدگی (بریسون و زاپاتا) [٢٠]

1. Peak

شرایط ساختگاهی

بر اساس بررسی‌های زمین‌شناختی مسیر خط (A) تونل مترو قم (مؤسسه مهندسین 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 ماسه لای و رس‌دار به‌همراه شن، با درصد ریزدانه ۳۵ تا ۶۰ درصد، واحد خاکی (Qf-1) متشکل از لای رس‌دار به‌همراه 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 محدودهٔ شهر قم، به هریک از چهار تیپ 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 محدودهٔ مطالعهٔ 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 می باشد. 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]



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

تشکیل‌دهندهٔ آن قاب خمشی فولادی و به‌صورت ترکیبی از دیوار حائل و برشی بوده و بر اساس طراحی انجام شده در این پروژه، به‌منظور 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 به‌نحوی انجام شد که امکان احداث رمپ خاکی تا تراز ۱۰- متری به‌منظور عبور ماشین آلات حفاری فراهم شود. لازم به ذکر است در طول ساخت پروژه، عملیات حفاری مسیر تونل مترو انجام نشد. مراحل ساخت در این پروژه بدین‌شرح است:

۱. پس از تعیین آکس‌گذاری دقیق ستون‌ها، گمانه‌هایی به‌صورت دستی تا ترازی پایین‌تر از طبقهٔ منفی شش و با در نظر گرفتن ضخامت فونداسیون سازه و شمع زیر ستون‌ها، حفاری شده و پس از جانمایی آرماتور شمع منفرد به‌همراه ستون فلزی داخل گمانه‌ها، بتن ریزی شمع به‌صورت درجا انجام شد. لازم به ذکر است که این شمع‌ها در تراز زیر فنداسیون اصلی سازه برای هر ستون اجرا می‌شود تا به‌عنوان 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 به‌صورت پایه در قسمت بالای ستون‌ها اجرا شده تا پس از قرار گرفتن در آکس دقیق خود، دچار حرکت کوچک نشود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

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

مشخصات خاک		Qc-1	Qc-2	Qf-1	Qf-2
چسبندگی (kg/cm2)	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/cm2)	بارگذاری	۳۰۰ ± ۵۰	۲۲۰ ± ۵۰	۱۹۰ ± ۵۰	۱۸۰ ± ۵۰
	باربرداری	۹۰۰ ± ۵۰	۷۰۰ ± ۵۰	۵۷۰± ۵۰	۶۰۰ ± ۵۰
مدول الاستیک در پی نواری (kg/cm2)	بارگذاری	۱۵۰ ± ۵۰	۱۲۰ ± ۵۰	۱۱۰ ± ۵۰	۱۰۰ ± ۵۰
	باربرداری	۴۷۰ ± ۵۰	۳۸۰ ± ۵۰	۳۳۰± ۵۰	۳۵۰ ± ۵۰
ضریب پواسون v		۰.۳	۰.۳	۰.۳۲	۰.۳
وزن مخصوص خشک (g/cm3)		۱.۷ ± ۰.۱	۱.۶ ± ۰.۱	۱.۵۵ ± ۰.۱	۱.۶ ± ۰.۱
وزن مخصوص کل (g/cm3)		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 منطقهٔ بررسی شده (مهندسین مشاور پی بنیان ایستا، ۱۳۹۳) [۲۳]

شناسایی نوع خاک		طبقه بندی					وزن مخصوص (g/cm^3)		پارامترهای مقاومتی			
		اندازه دانه ها			حدود اتربرگ				عدد نفوذ استاندارد	برش مستقیم		
عمق	لایه‌بندی	در صد شن	در صد ماسه	درصد ریزدانه	حد روانی	حد خمیری	تر	خشک	N2+N3	زاویهٔ اصطکاک داخلی (D)	چسبندگی (kg/cm^2)	نوع آزمایش
۲	ماسه لای دار و لای ماسه دار با تراکم متوسط	۰	۶۰	۴۰	-	NP	۱.۶۹	۱.۶۳	۲۲	۲۳	۰.۰۶	سریع
۴		۰	۵۴	۴۶	-	NP	۱.۷۵	۱.۶۷	۲۵			
۶		۰	۴۷	۵۳	-	NP	۱.۸۴	۱.۶۴	۲۵			
۸		۱۷	۶۹	۱۴	-	NP	۱.۸	۱.۷۴	۲۸			
۱۰	رس لای دار	–	۸	۹۲	۲۸	۷	۱.۷۶	۱.۵۶	۲۲	۲۱	۰.۲	سریع

پارامترهای مقاومتی			وزن مخصوص (g/cm^3)		طبقه بندی					شناسایی نوع خاک	
برش مستقیم		عدد نفوذ استاندارد			حدود اتربرگ		اندازه دانه ها				
نوع آزمایش	چسبندگی (kg/cm^2)	زاویهٔ اصطکاک داخلی (D)	N2+N3	خشک	تر	حد خمیری	حد روانی	درصد ریزدانه	در صد ماسه	در صد شن	لایه‌بندی	عمق
سریع	۰.۰۶	۲۷	۳۲	۱.۶۹	۱.۶۹	NP	-	۱۳	۵۴	۳۳	ماسه همراه با شن و لای با تراکم زیاد	۱۲
			۳۲	۱.۷۱	۱.۷۵	NP	-	۸	۷۰	۲۲		۱۴
			۲۸	۱.۹۸	۱.۷۶	NP	-	۶	۶۹	۲۵		۱۶
سریع	۰.۰۲	۳۸	>۵۰	۲.۰۱	۲.۰۵	NP	-	۴	۲۵	۷۱	شن ماسه دار	۱۸
			>۵۰	۲.۰۶	۲.۱	NP	-	۱۰	۲۲	۶۸		۲۰
			>۵۰	۱.۶۶	۲.۱۵	NP	-	۷	۴۴	۴۹		۲۲
سریع	۰.۱۳	۲۶	۲۴	۱.۵۸	۱.۸۶	۷	۲۹	۸۰	۳۰	-	رس لای دار و لای به همراه ماسه با تراکم متوسط	۲۴
			۲۵	۱.۷۵	۱.۷۹	۷	۲۷	۷۷	۲۳	-		۲۶
			۲۵	۱.۷۵	۱.۹۵	NP	-	۹۴	۶	-		۲۸
			۲۷	۱.۶۵	۱.۸۵	۶	۲۴	۸۸	۱۲	-		۳۰
			۲۵	۱.۶۱	۱.۸	NP	-	۵۲	۴۸	-		۳۲
سریع	۰.۰۱	۲۹	>۵۰	۱.۷۶	۱.۸۴	NP	-	۶	۴۹	۴۵	شن ماسه دار	۳۴
			>۵۰	۱.۹۹	۲.۰۹	NP	-	۱۶	۴۱	۴۳		۳۶
سریع	۰.۲۲	۲۱	۲۸	۱.۶۳	۱.۸۵	۶	۲۱	۹۴	۶	-	رس لای دار	۳۸
			۲۷	۱.۶۷	۱.۸۷	۵	۳۰	۹۲	۸	-		۴۰

۲. دیوار حائل پیرامونی از تراز صفر و به‌تدریج با پیشرفت حفاری به‌صورت پانلی، قالب‌بندی و بتن‌ریزی شد (شکل ۳ الف). برای این منظور در ترازهای پایین، حفاری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

ترانشه به عمق‌های حدود ۳ تا ٤ متر و عرض ۱/۵ متر به‌صورت 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 به‌سمت پایین افزایش یابد (شکل ۳ ج).

٤. 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 به‌صورت یک‌پارچه بتن‌ریزی شدند (شکل ۳ د).

٦. 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 پروژهٔ عمار یاسر از فروردین ۱۳۹۵ به‌مدت یک سال انجام شد. در این پروژه تغییر شکل دیواره گود در سه مقطع (A) و (B) و (C) که به‌واسطهٔ 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 به‌سمت پایین و ایجاد محدودیت در عملیات پایش، در هر مقطع حداکثر ۹ تارگت در ترازهای ۰ ، ۱/۵- ، ۳- ، ٤/۵- ، ٦- ، ۷/۵- ، ۹- ، ۱۰/۵- ، ۱۳- و در مجموع ۲۷ منشور برچسبی درون گود نصب و قرائت شد. محدودهٔ پروژه و مقاطع پایش شده (A) و (B) و (C) به‌همراه ٦ نقطه مرجع با نام‌های (R1) تا (R6M)، در شکل ۳ نشان داده شده است.

هم‌چنین ٦ نقطه مرجع ثابت با نام‌های (R1)، (R2H)، (R3H)، (R4P)، (R5M) و (R6M) روی ساختمان‌های اطراف گود با رعایت فاصله و دید مناسب به‌منظور قرائت با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

دوربین در هر دوره از پایش انتخاب شد. محدودهٔ پروژه و مقاطع پایش شده (A) و (B) و (C) به‌همراه ٦ نقطه مرجع، مطابق شکل ٤ 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 به‌صورت مرحله‌ای، د) تکمیل فونداسیون

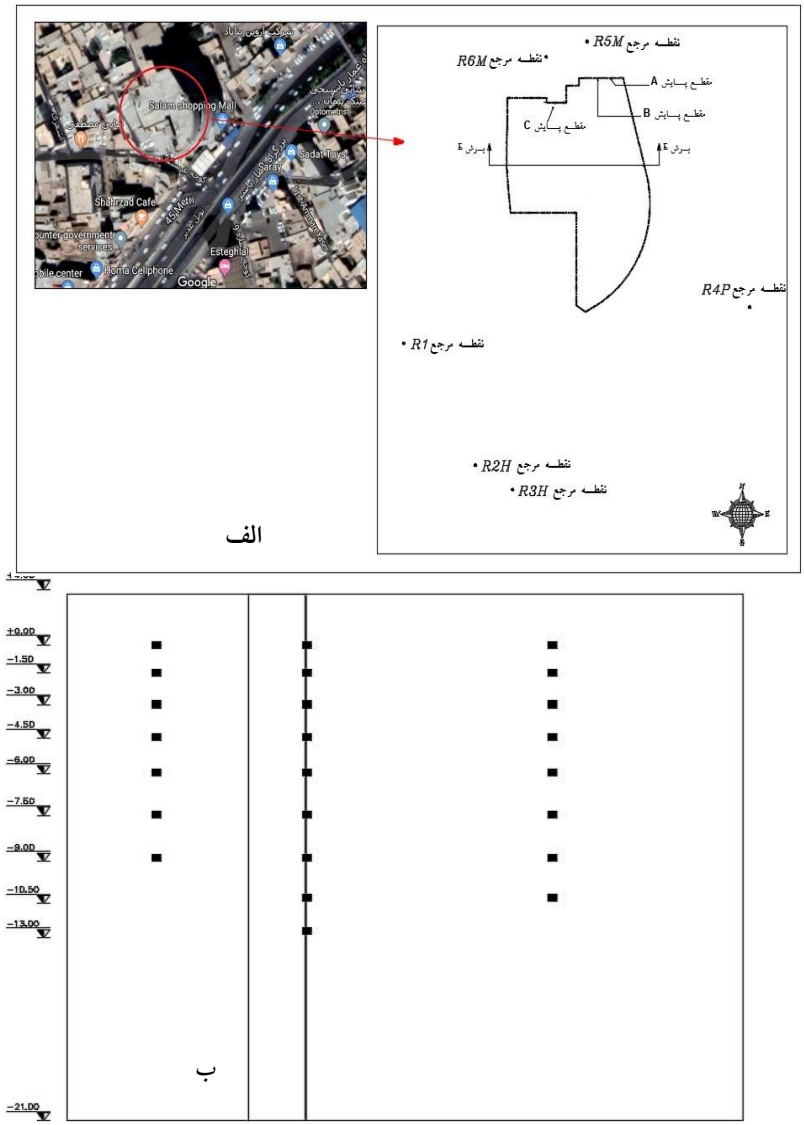
مکانیزم عملیات پایش به این صورت بوده است که بعد از تعیین نقاط مورد نظر در داخل گود، نقاط مرجع نیز در فواصل مناسب از گود، انتخاب شده که براساس آن تغییر شکل نقاط درون گود با استفاده از این نقاط مرجع اندازه‌گیری شود. فرض بر این است که در طول پروسه حفاری و احداث سازه نگهبان، نقاط مرجع بدون جابه‌جایی هستند.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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]



شکل ٤. الف) پلان پروژه مورد نظر و موقعیت نقاط مرجع در پایش با دوربین توتال استیشن، ب) برش E موقعیت نقاط پایش شده درون گود

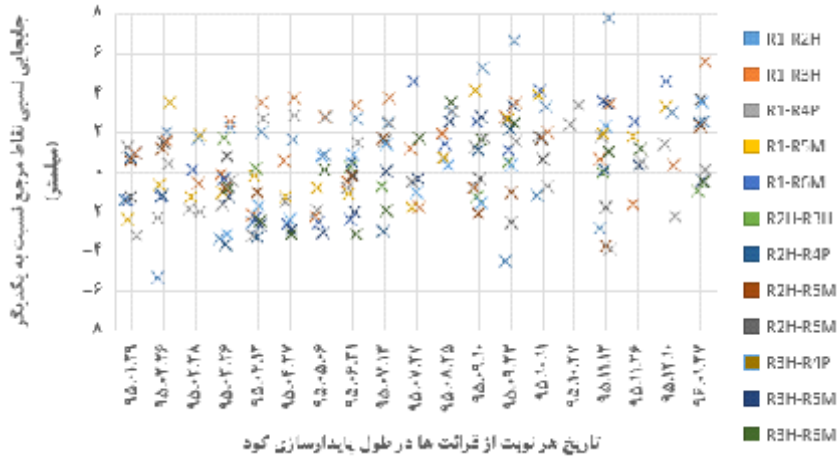
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

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 فاصلهٔ بین نقاط داخل گود از نقاط مرجع، بیان‌گر تغییرشکل نقاط درون گود است.

طی این دوره ۱۲ ماهه، در مجموع ۱۹۵ مرتبه فاصلهٔ نقاط مرجع نسبت به یک‌دیگر اندازه‌گیری شدند. برای این منظور، میانگین فاصلهٔ 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 ٤ 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 فاصلهٔ 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[1] در قرائت با منشورهای برچسبی تا فاصله ۲۵۰ متری، ۵ میلی‌متر تعیین شده است [٢٤]، 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 ٦ 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 برچسبی نصب شده در ترازهای مختلف به‌منظور اندازه‌گیری تغییر شکل جانبی نقاط است. مطابق شکل، بیش‌ترین تغییرشکل جانبی ثبت شده ٤٧ 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 به‌دلیل اجرای سقف‌ها، تغییر شکل‌ها به مقادیر ثبت شده محدود شده است. بنابراین می‌توان دریافت که این روش پایدارسازی گود، به‌دلیل اجرای دال‌های بتنی در تراز طبقات دارای عملکرد مناسبی در کنترل تغییرشکل است. هم‌چنین به‌دلیل اجرا نشدن دال بتنی در دو تراز صفر و ۳- متر به‌منظور سهولت در انجام عملیات حفاری، مقادیر تغییرشکل در این ترازها بیش‌تر از سایر نقاط است. به‌همین 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

در ترازهای اولیه گود، کنترل تغییر شکل‌ها به مقادیر کم‌تر از ٤٧ 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 ٧ و ٨ 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 ٤٢/١٦و ٤٧/٢١ میلی‌متر ثبت شده است. لازم به ذکر است به‌دلیل عملیات اجرایی پروژه، پایش‌های میدانی با محدودیت‌های مواجه شد، به این ترتیب که تغییرشکل‌ها در مقطع (B) تا تراز ١٤- متری و در مقطع (C) تا تراز ٩- قرائت و ثبت شد.

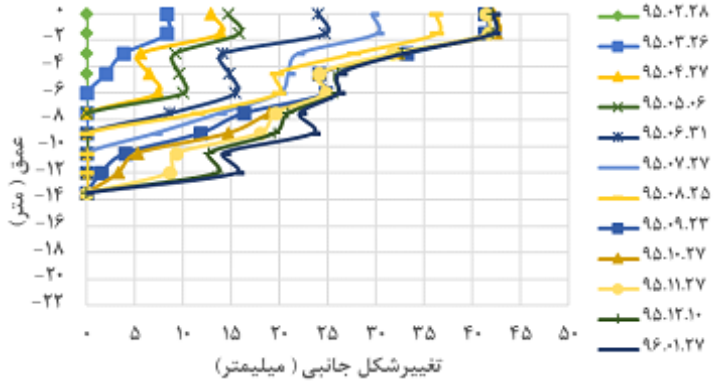
نتایج گراف‌ها نشان می‌دهد، پایدارسازی گود با استفاده از سیستم ساخت از بالا در این پروژه، جابه‌جایی‌های زمین را تا حد زیادی کنترل کرد. با وجود این، بر اساس شکل ٨، روند صعودی تغییرشکل‌ها در مقطع (C) مشاهده می‌شود. به‌طوری‌که با توجه به عملیات پایش مشخص شد طی مدت ٥٤ روز یک جهش در میزان تغییر شکل‌ها از ١٣ میلی‌متر تا ٣٢ میلی‌متر رخ داده است. دلیل وقوع چنین جهشی را می‌توان نبود مهاری‌های 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 اندازهٔ 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 نقشهٔ 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. تغییرشکل جانبی نقاط پایش شده درون گود



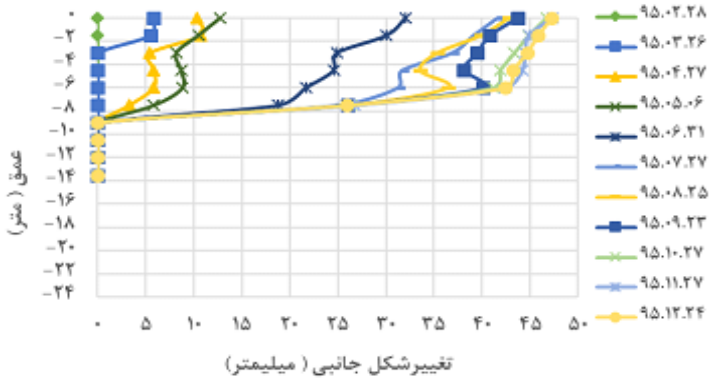
شکل ۷ . نمودار تغییر شکل جانبی مقطع B در پایش‌های میدانی در تاریخ‌های مختلف

مطابق شکل ۹ با توجه به عمق نهایی گود در ۲۱- متری از تراز سطح زمین، با وجود افزایش مقادیر تغییرشکل در مقطع (C)، تمامی نقاط پایش شده دارای نسبت تغییر شکل جانبی بیشینه به عمق گود، در محدودهٔ 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[1] در محدودهٔ مجاز است [۹]. با وجود این، افزایش جابه‌جایی‌های توده خاک این مقطع در طول ساخت، مطابق

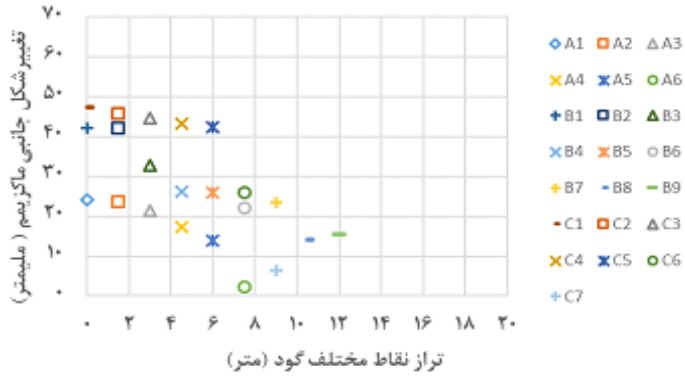
1. Wang et al. (2010)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

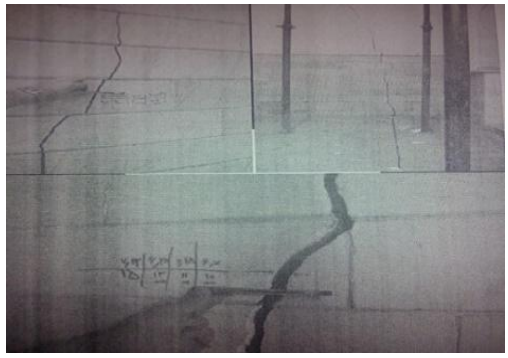
با شکل۱۰ الف منجر به ترک خردگی ساختمان مجاور گود شد. در شکل ۱۰ ب مقطع (C) قبل از اصلاح روش ساخت و هم‌چنین نحوهٔ نصب مهاری‌های اضافی در این مقطع برای کنترل تغییر شکل‌ها در شکل ۱۰ ج نشان داده شده است.



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



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



الف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]



ب ج

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

مدل سازی عددی

۱. مشخصات مدل عددی

مدل‌سازی عددی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس[1] انجام شد. مدل رفتاری خاک موهر-کولمب[2] 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 به‌صورت دوبعدی مدل شده است. محدودهٔ تأثیر گود در این مدل‌ها، بیش از محدودهٔ 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 به‌عمل آمد. مش‌بندی خاک ساختگاه، دیوار حائل، شمع‌های منفرد و فونداسیون با تکنیک استراکچر[3] 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

توجه به عملیات پایدارسازی گود به‌صورت مرحله‌ای، مدل‌سازی عددی در ۳۳ مرحله انجام شد. هم‌چنین اصطکاک بین خاک و دیوار صفر در نظر گرفته شد. به‌دلیل نصب مهاری‌ها و اجرای دیوار به‌صورت مرحله‌ای و هم‌چنین صلبیت محل اتصال آنها به یک‌دیگر، از دستور مرج[1] برای اتصال اعضای مهاری 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)، مهاری‌ها در مدل عددی این مقطع، به‌صورت منظم و با فواصل یک‌سان به سختی معادل تبدیل شد. هم‌چنین شمع‌های منفرد به‌صورت المان‌های مدفون[2] در خاک مدل شد. لازم به‌ذکر است که محدودهٔ تأثیر گود درجهت عمودی در مدل عددی ۲/۵ برابر عمق نهایی گود (٥٦ متر) و درجهت افقی ۳ برابر عمق گود (۷۰) متر در نظرگرفته شده است. شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه با توجه به گزارش‌های ژئوتکنیکی انجام شده در محل پروژه (مهندسین مشاور پی بنیان ایستا، ۱۳۹۳) تا عمق ٤۰- متری و در قالب ساختگاه‌های معرفی شده به‌وسیلهٔ بررسی‌های مترو خط (A)، در پنج لایه تعریف شد، لایهٔ اول به‌ترتیب (Qc-2) از تراز زمین تا تراز ١٦- متر، لایهٔ دوم (Qc-1) از تراز ١٦- متری تا کف گود، لایهٔ سوم (Qf-2) به ضخامت ۱۰متر تا تراز ۳۰- متری، لایهٔ چهارم (Qc-1) با ضخامت ٤ متر و در نهایت لایهٔ پنجم (Qf-2) از تراز ٣٤- تا کف مدل تعریف شده است. در جدول ۳ جزییات روند مدل‌سازی عددی برای مقطع C بر اساس توالی ساخت در پروژهٔ 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، زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی لایه‌ها انجام شد. سایر پارامترها براساس مقادیر پیش فرض در نرم‌افزار برای مدل خاک موهر-کولمب در نظر گرفته شد. در این پژوهش آنالیز حساسیت با پردازش ٦۰ مدل عددی انجام شد. براساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، با افزایش پارامترهای مدول الاستیسیته

1. Merge
2. Embeded

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

مرحلهٔ اول	استپ ۳-۱	اعمال بار، نصب ستون‌های سازه به همراه شمع کیسونی و اتصال قاب‌ها
مرحلهٔ دوم	استپ۵-٤	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ٤-
مرحلهٔ سوم	استپ۷-٦	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ٤-
مرحلهٔ چهارم	استپ ۹-۸	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۸-
مرحلهٔ پنجم	استپ۱۰	اجرای دیوار تا تراز ۳/۵+ و نصب مهاری افقی در تراز ۱/۵+
مرحلهٔ ششم	استپ۱۲-۱۱	اجرای سقف تراز ۳/۵- و حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۸-
مرحلهٔ هفتم	استپ۱٤-۱۳	اجرای سقف در تراز ۷- و حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱۲-
مرحلهٔ هشتم	استپ ۱٦-۱۵	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱٤-
مرحلهٔ نهم	استپ۱۷	نصب مهاری افقی در تراز ۳/۵- و نصب اولین یال خرپای بزرگ
مرحلهٔ دهم	استپ ۱۸	نصب مهاری افقی در تراز۷/۵- و تکمیل یال‌های خرپای بزرگ
مرحلهٔ یازدهم	استپ۱۹	نصب مهاری و اجرای سقف در تراز ۱۰/۵-
مرحلهٔ دوازدهم	استپ ۲۱-۲۰	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱٦-
مرحلهٔ سیزدهم	استپ۲۲	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۱٤/۵-
مرحلهٔ چهاردهم	استپ۲۳	نصب مهاری و اجرای سقف در تراز ۱٤-
مرحلهٔ پانزدهم	استپ۲۵-۲٤	حفاری محل دیوار و احداث دیوار بتنی تا تراز ۱۸-
مرحلهٔ شانزدهم	استپ۲٦	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۱۷-
مرحلهٔ هفدهم	استپ ۲۷	نصب مهاری و اجرای سقف در تراز۱۷/۵-
مرحلهٔ هجدهم	استپ۲۸	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۱۹-
مرحلهٔ نوزدهم	استپ۳۰-۲۸	حفاری دهانه ابتدایی تا تراز ۲۱- و حفاری محل دیوار و احداث دیوار تراز۲۱-
مرحلهٔ بیستم	استپ ۳٤-۳۱	ادامه حفاری دهانه‌ها تا تراز ۲۱- و اجرای فنداسیون به‌صورت مرحله‌ای

و زاویهٔ اصطکاک داخلی برای لایهٔ اول ($\varphi 1$، E1) و مدول الاستیسته لایهٔ سوم (E3)، تغییرشکل جانبی کاهش پیدا کرد. هم‌چنین با افزایش چسبندگی لایهٔ اول (C1)، از مقدار صفر تا ۱۷ کیلو پاسکال، تغییرشکل 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 به‌وجود بخش زیادی از عملیات خاکبرداری در لایهٔ اول، که تا ارتفاع ۱٦ 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

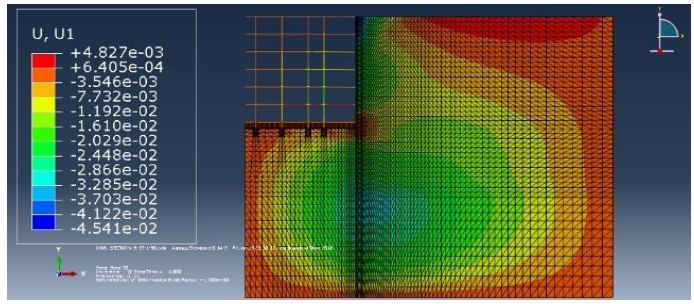
حفاری و پایدارسازی گود و با رسیدن تراز گود به عمق ۸- متر و برای مقطع (C) تا یک‌صد و پنجاهمین روز از عملیات حفاری و رسیدن تراز گود به عمق ۱۱- متر، کالیبره شد. مقادیر کالیبره شده پارامترهای ساختگاهی پروژه مطابق با جدول ٤ ارائه شد. در این جدول به‌ترتیب پارامترهای وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویهٔ اصطکاک داخلی و زاویهٔ 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 تغییرشکل 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.

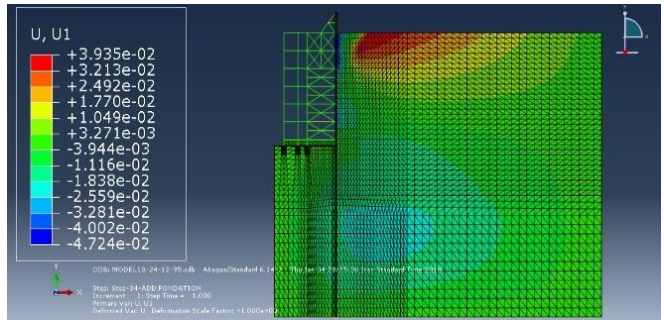
با مقایسه نتایج مشخص شد که تا پایان مراحل ساخت در هر مقطع، مقدار تغییر شکل بیشینه جانبی دیوار در مقطع (B) به ٤٥/٤ میلی‌متر و در مقطع (C) به ٤٦/٧ میلی‌متر رسید. این در شرایطی است که مطابق با نتایج حاصل از پایش‌های میدانی، بیشینه تغییر شکل جانبی دیوار تا پایان مراحل ساخت، برای مقاطع (B) و (C) به‌ترتیب ٤٢/١٦ و ٤٧/٢١ 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 ١٤- متر و در مقطع C تا عمق ۹- متر، تغییر شکل‌های دیواره گود قرائت شد.

جدول ٤. پارامترهای کالیبره شده ساختگاهی در مدل سازی عددی گود

لایه خاک	ارتفاع لایه (متر)	وزن مخصوص خاک (KN/m3)	مدول الاستیسیته (KN/m2)	چسبندگی (KN/m2)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	زاویه اتساع (degree)
لایه اول Qc-2	۰-۱٦	۱/۷۵۰	۲۴۰۰۰	۱۰/۵	۲۸	۰
لایه اول Qc-1	۱٦-۲۲	۱/۶۵۰	۲۸۰۰۰	۲/۸۰	۳۲	۲
لایه اول Qf-2	۲۲-٤۰	۱/۶۵۰	۱۱۰۰۰	۱۳	۲۶	۰

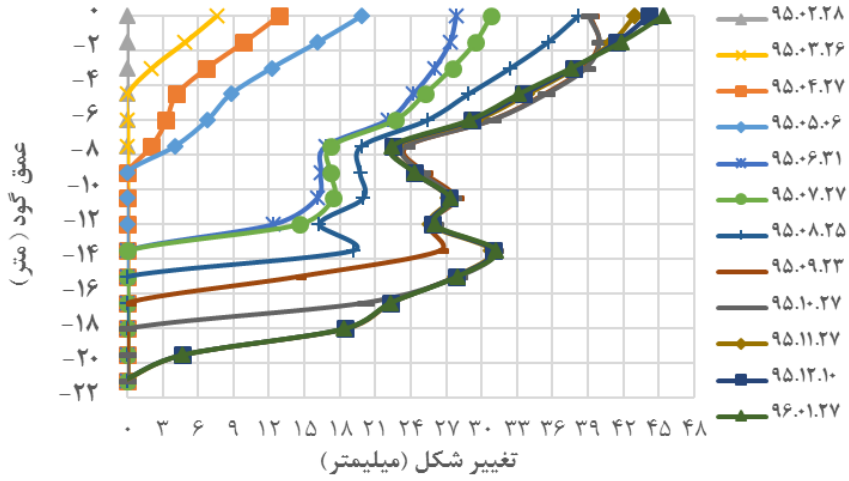


الف



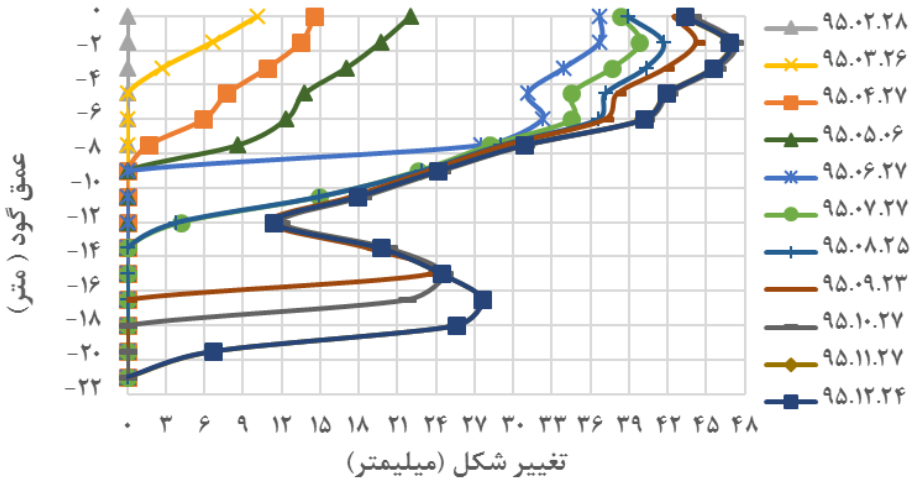
ب

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



الف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]



ب

شکل ۱۲. پیش بینی 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، درقالب چهار ساختگاه پیشنهادی

در سال‌های اخیر با توجه به گسترش گودهای عمیق در محیط‌های شهری، معمولاً روش‌های مبتنی بر نیرو 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 نظرگرفته‌اند، 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 درنظر گرفته شده و مقادیر اولیه این پارامترها برای متغیرهای سازه‌ای مطابق

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

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

عمق گود H(m)	عرض دهانه قابها Sp	عمق نفوذ دیوار D(m)	طول شمع منفرد T(m)	سربار Q(kpa)	عرض گود w(m)	فاصله قائم مهاری ها Sv(m)	فاصله افقی مهاری ها Sh(m)	مدول الاستیسته دیوار E(Mpa)	ممان اینرسی دیوار I(m4/m)	پارامترهای سیستم مهاری
۲۱	۵	۲	۲	۰	۱۷	۵/۳	۵	۲۵۰۰۰	۰.۰۰۵۳	مقدار

به‌منظور بررسی پارامتریک، ویژگی‌های سازه‌ای در چهار ساختگاه ذکر شده، به‌صورت 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، ٤۰، ۷۰، ۱۰۰ سانتی متر انتخاب شد. هم‌چنین مقدار سختی خمشی دیوار هم با اعمال ضرایب ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ به‌صورت متغیر در نظر گرفته شد. برای تعیین تأثیر فواصل قائم مهاری‌ها، مقادیر ۳/۵، ٤ ، ۵ متر انتخاب و هم‌چنین برای تعیین تأثیر فاصله افقی مهاری‌ها، در هر یک از شرایط ساختگاهی، مقادیر ۳/۷۵، ۵، ٦/۲۵ و ۷ متر در نظر گرفته شد. لازم به‌ذکر است به‌دلیل شبیه‌سازی مدل عددی به‌صورت دوبعدی، اثر فواصل افقی مهاری‌ها معادل با سختی محوری مهاری‌ها، تعریف شد. هم‌چنین مقادیر عرض دهانه قاب‌های سیستم مهاری ۳، ٤، ۵ و ۷ متر به‌عنوان متغیر لحاظ شد. داده‌های به‌دست 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 ٤٤ داده موجود است که امکان تعیین سختی سیستم مهاری بر اساس کنترل تغییر شکل را فراهم می‌کند.

مطابق جدول ٦ اهمیت نسبی مقادیر مختلف پارامترهای سازه‌ای سیستم مهاری در تعیین تغییر شکل دیواره گود بیان شده است. لازم به‌ذکر است که شیب حاصل از نمودار تغییر شکل به‌ازای مقادیر مختلف هر یک از پارامترها، بیانگر اهمیت نسبی پارامتر مذکور بر روند

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

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

جدول ٦. اهمیت نسبی پارامترهای سازه‌ای در هر یک از شرایط ساختگاهی

نوع پارامتر سازه ای	درصد اهمیت نسبی پارامترهای سازه ای در شرایط ساختگاهی مختلف			
	Qc-1	Qc-2	Qf-1	Qf-2
I	٩/٣۴	۶/۵٣	٨/٧١	۶/۴٢
E	٧/٨٩	٣/۵٩	۶/١	۴/١٣
Sh	١١/١	۵/٧٣	٨/۵٢	٧/۵۵
Sv	١۵/٩۵	٨/١٧	١٢/۴	١١/۴٧
W	١٠/۴٢	٢/۴	۴/٣١	٣/٧٨
T	٣/٣٣	١/٧١	٣/٢٢	٣/٩۵
Sp	۵/٧۵	٢/١۴	٣/١٣	٢/٠٩
D	٢/۶	٠/٠٣	٠/۶۵	٠/٣۴

به‌طورکلی مطابق جدول ٦ 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.

براساس آنالیز حساسیت، افزایش مقادیر فواصل قائم و افقی مهارهای جانبی، باعث افزایش مقادیر تغییرشکل جانبی می‌شود. لازم بذکر است در ساختگاه (Qc-1) بر خلاف ساختگاه‌های دیگر، افزایش عرض گود همواره با افزایش تغییرشکل 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

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.

٤. تعیین سختی سیستم مهاری بر اساس تغییرشکل، در ساختگاه‌های پیشنهادی

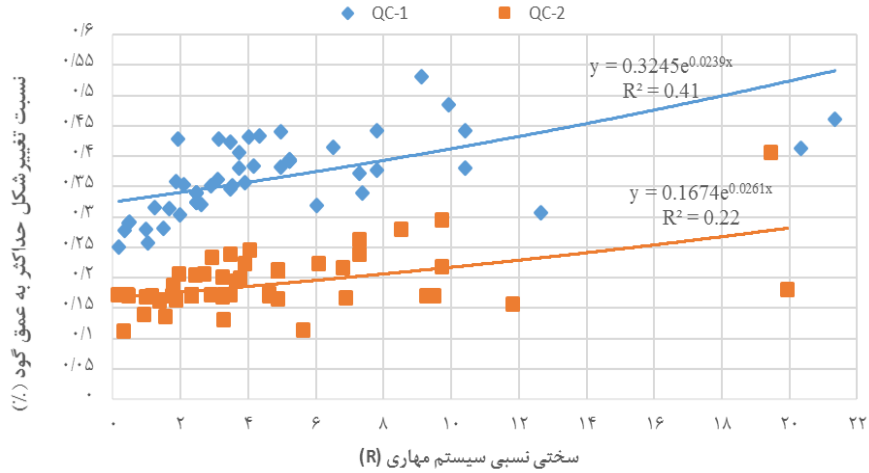
بر اساس نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای سازه‌ای و هندسی در هر چهار ساختگاه، مشخص شد که ساختگاه (QC-2) به‌دلیل پایداری ذاتی، کم‌ترین تأثیرپذیری را از تغییرات پارامترهای سازه‌ای دارد. چنان‌که قبلا ذکر شد، در پژوهش‌های بریسون و زاپاتا[1] از پارامتری به‌نام سختی نسبی (R) به منظور ایجاد ارتباط بین بیشینه تغییر 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) نشان‌دهندهٔ سیستم مهاری صلب و مقادیر بزرگ تر از آن نشان‌دهندهٔ 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 رابطهٔ (۲) پارامتر سختی نسبی بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$R = \frac{Es}{E} * \frac{Sh*Sv*H}{I} * \frac{SP}{WTD} \qquad (۲)$$

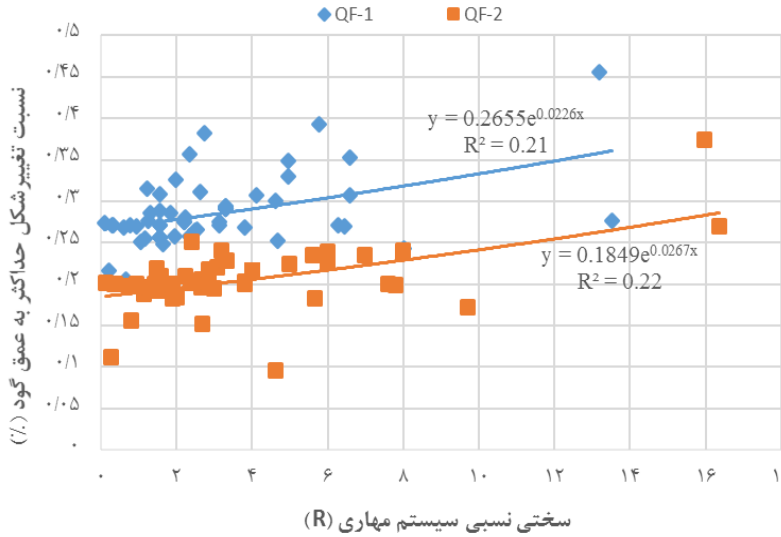
پارامترهای (Es)، (E)، (Sh)، (Sv)، (H)، (I)، (Sp)، (W)، (T)، (D) به‌ترتیب مدول سختی خاک، مدول الاستیسیته دیوار، فاصله افقی مهاری‌ها، فاصله قائم مهاری‌ها، ارتفاع گود، ممان اینرسی دیوار در واحد طول، عرض دهانه قاب‌های مهاری، عرض گود، طول شمع‌های منفرد و عمق مدفون دیوار است. بر این اساس، مجموعا ۱٦۰ مدل عددی 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 ۱۳ الف) و ب نشان داده شده است.



شکل ۱۳. الف) نسبت بیشینه تغییرشکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه‌های (QC)



شکل ۱۳. ب) نسبت بیشینه تغییرشکل ایجاد شده به عمق گود در برابر سختی نسبی برای ساختگاه‌های (QF)

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

(QC-2) و (QF-2) بین محدوده ۰/۱و 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 محدودهٔ ۰/۲۵ تا ۰/۳ و برای ساختگاه (QC-1) بین محدوده ۰/۲۵ تا ۰/٤ 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 (٦) تغییر شکل بیشینه ایجاد شده را به‌ترتیب 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:

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

(٤) ساختگاه (QC-2) $\delta hmax\,/\,H\% = 0.1674e^{0.0261R}$

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

(٦) ساختگاه $(QF-2)$ $\delta hmax-H\% = 0.1849e^{0.0267R}$

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 دیوارهٔ گود مرتبط می‌سازد، بنابراین با وجود روابط ارائه شده برای هر ساختگاه، می‌توان اقدام به طراحی سیستم مهاری براساس کنترل تغییر شکل در محدودهٔ مجاز کرد. لازم به‌ذکر است که نتایج این پژوهش در حفاری و پایدارسازی گودهای واقع در محدودهٔ 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 آیین‌نامهٔ طراحی و اجرا برای این روش، انجام بررسی‌های این چنین می‌تواند به

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

طراحان یک دید کلی از عملکرد این روش از دیدگاه تغییرشکل 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 به‌روش 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 تغییرشکل‌ها، 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 پایداری‌سازی گود، به‌ترتیب ٤۲/۱٦ و ٤۷/۲۱ میلی‌متر ثبت شد. هم‌چنین تغییر شکل سایر نقاط درون گود کم‌تر از ۳۰ 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 تغییرشکل در مقطع (C) و هم‌چنین عمق نهایی گود تا تراز ۲۱- متری، نسبت تغییر شکل جانبی بیشینه به عمق گود برای تمامی نقاط مورد پایش تا پایان عملیات حفاری، در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۲۲ درصد و با میانگین ۰/۱۲ درصد، محاسبه شد که این مقادیر با پژوهش‌های وانگ مطابقت دارد.

٤. براساس تحلیل حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی به‌منظور دست‌یابی به مدل عددی کالیبره شده مشخص شد، پارامترهای ژئوتکنیکی لایه اول ساختگاه پروژه بیش‌ترین تأثیر را بر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

تغییر شکل جانبی دارند. علت این تأثیر را می‌توان به‌وجود 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 به‌وقوع تغییرشکل‌های 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، مجددا تعریف شد. بر این اساس، سختی سیستم مهاری با توجه به مقادیر مجاز تغییر شکل و با استفاده از ٤ رابطهٔ نمایی برای هر یک از ٤ 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 QF-1 و QC-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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

2. OSHA "Excavation: construction safety and health outreach program", Occupational Safety & Health Administration-Home Accessed, April 19 (2013).

۳. بازیار م. ح.، "دینامیک خاک"، انتشارات دانشگاه علم وصنعت 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, NewYork (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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

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, Milvaukee, (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.

۱٤. شیرغلامی و.، خداپرست م.، "ابزارسنجی و ارزیابی تغییر شکل درپایدارسازی گود به‌روش ساخت از بالا (Top-Down) به‌همراه مطالعهٔ موردی"، پنجمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی تهران ICSAU ، (۱۳۹٦) ٥-۱۲.

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.4.8]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.669]

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 مهندسین مشاور ساحل، "خدمات مهندسی پروژهٔ مترو قم خط- A"، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل SCE 2000 UNGR TUN EG RP-B0 (۱۳۹۰).

۲۳. مهندسین مشاور پی بنیان ایستا، "گزارش مطالعات ژئوتکنیک پروژه مجتمع تجاری ساداتی (سلام) "، ۸۸۲۷/۱ (۱۳۹۰)۸۸۲٦.

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.، خداپرست م.، "طراحی پایدارسازی گود به‌روش Top-Down بر اساس سطح عملکرد مبتنی بر کنترل تغییرشکل با استفاده از مطالعات عددی و میدانی"، دانشکدهٔ فنی مهندسی دانشگاه قم، ایران (۱۳۹۵).

۲٦. شیرغلامی و.، خداپرست م.، "ارزیابی پایدارسازی گود به‌روش ساخت از بالا در کنترل تغییر شکل دیواره‌های گود بر اساس مطالعات عددی و میدانی (مطالعهٔ موردی)"، دانشکدهٔ فنی مهندسی دانشگاه قم، ایران (۱۳۹۷).