

رفتارنگاری گود پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا با استفاده از مطالعات عددی و میدانی (مطالعه موردی)

تغییرات تنش در اثر حفاری فضاهای زیرزمینی، باعث تغییرشکل زمین اطراف گود می‌شود. بنابراین، چنانچه گودبرداری در مجاورت بافت فرسوده و یا سازه‌های حساس مد نظر باشد، کنترل تغییرشکل زمین با بهره‌گیری از ابزار پایش مناسب، ضروری است. پیش‌بینی روند تغییرشکل‌های زمین نیازمند مدل‌سازی عددی و کالیبراسیون آن با مطالعات میدانی می‌باشد؛ از این رو، شناخت دقیق ابزار مورد استفاده و تعیین دقت آن اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه، رفتارنگاری و مدل‌سازی عددی یک گود پایدارسازی شده به شیوه ساخت از بالا مد نظر است که در یکی از مناطق پرتردد مرکزی شهر قم قرار دارد. برای این منظور، مراحل ساخت در روش ساخت از بالا به صورت مقطعی مورد پایش قرار گرفته و داده‌های به‌دست آمده از مطالعات میدانی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سپس براساس اطلاعات به‌دست آمده، مدل عددی کالیبره شده و روند تغییرشکل با انجام مطالعات عددی پیش‌بینی می‌گردد. بر این اساس، در صورت لزوم طراحی سازه و مراحل اجرا به منظور بهینه‌سازی و یا اقتصادی نمودن طرح، مورد بازبینی قرار می‌گیرد. وجود بافت فرسوده و یک ساختمان پنج طبقه در مجاورت گود، بیانگر اهمیت این مطالعه می‌باشد. مطالعات میدانی با استفاده از دوربین توتال استیشن صورت گرفته است. براساس مطالعات آماری صورت گرفته در این تحقیق، دقت دوربین توتال استیشن در پایش گود مورد مطالعه مقدار مطلوبی جهت کنترل مراحل ساخت و در صورت لزوم اصلاح آن در حین رفتارنگاری می‌باشد؛ با این وجود بر استفاده از ابزار دقیق‌تر در مطالعه گودهای عمیق با خطر زیاد تأکید می‌گردد.

واژگان کلیدی: دوربین توتال استیشن، ساخت از بالا، رفتارنگاری، دقت پایش، مدل عددی.

احسان قربانی

دانشجوی کارشناسی ارشد
ژئوتکنیک، دانشکده فنی
مهندسی، دانشگاه قم.
پست الکترونیک:
e.ghorbani@stu.qom.ac.ir

مهدی خداپرست*

دانشیار، دانشکده فنی مهندسی،
دانشگاه قم.
پست الکترونیک:
khodaparast@qom.ac.ir

ابوالقاسم معزی

عضو هیات علمی گروه عمران،
دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه
قم.
پست الکترونیک:
ghasemmoezy@yahoo.com

۱- مقدمه

همکاران، با بررسی تعداد ۵۰ ساختمان در مجاورت گودهای عمیق تعداد ۴۵ عدد از آن‌ها دچار صدمات مختصر تا جدی شده بودند [۲]. حفاری در مجاورت ساختمان‌ها یا تأسیسات زیرزمینی، نیازمند استفاده از یک روش پایدارسازی کارآمد برای کنترل محدوده تغییرشکل و جلوگیری از تأثیرپذیری سازه‌های مجاور در تمامی مراحل حفاری و احداث سازه نگهبان است.

یکی از روش‌های نوین اجرایی استفاده از تکنیک ساخت از بالا در اجرای سازه‌های زیرزمینی است که ضمن کاهش زمان اجرا و کنترل تغییرشکل فضای اطراف گود، شرایط لازم برای احداث سازه در فضاهای محدود و یا پرتردد شهری را فراهم می‌کند. در این روش، زمان ساخت

با توسعه ساخت و سازه‌های زیرزمینی و استفاده از فضای زیر زمین، حفاری‌های عمیق در مناطق شهری و تأثیرات محیطی آن‌ها در حال افزایش می‌باشد که به یکی از معضلات کلان شهرها تبدیل شده است. حفاری عمیق منجر به تغییرات در تنش و در نتیجه تغییرشکل زمین‌های مجاور می‌شود [۱]. مطابق با مطالعات بون^۱ و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۰۹/۱۵، بازنگری ۱۳۹۷/۰۲/۱۵ پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۲۶.
DOI: 10.22091/cer.2018.3258.1122 شناسه دیجیتال

¹- Boone

با انجام همزمان پایدارسازی و احداث سازه اصلی و حذف زمان مورد نیاز برای نصب و برداشتن مهارهای موقتی کاهش یافته و همچنین تغییرشکل زمین و سازه‌های مجاور گود به علت سختی زیاد سیستم به کار گرفته شده کاهش می‌یابد [۳]. مطالعات زیادی برای کاهش تأثیر حفاری در محیط مجاور گود صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که حفاری به روش ساخت از بالا تأثیر زیادی در کنترل تغییرشکل سازه‌های مجاور دارد [۱ و ۳-۶]. از مزایای این روش، عدم ایجاد اختلال در عبور و مرور در مسیرهای اصلی، پرتراфик و مناطق مرکزی شهر (از قبیل پارکینگ‌های طبقاتی، ایستگاه‌های مترو و غیره) است [۷]. از سویی دیگر، از معایب این روش می‌توان به زمانبر بودن عملیات عمل‌آوری بتن دال و حفاری در زیر دال ریخته شده در فضای بسته اشاره کرد که در حین اجرا با پیچیدگی‌هایی همراه است.

محققین و مهندسين در سال‌های اخیر به دنبال بهبود روش کلاسیک ساخت از بالا با اعمال اصلاحاتی در مراحل حفاری و پایدارسازی بوده‌اند. عواملی نظیر بهینه‌سازی زمان و هزینه و عدم سهولت اجرا در روش کلاسیک، موجب شده‌اند تا محققین همواره به دنبال تکنیک‌های جدید و اصلاح روش‌های موجود در اجرای فضاهای زیرزمینی با استفاده از این سیستم باشند [۳، ۵ و ۸-۱۱]. به منظور اجرای سقف در این سیستم، قالب‌بندی بدون جک و شمع باعث ایجاد فضای کار کافی در حفاری تا پیش از عمل‌آوری بتن در زیر قالب‌های معلق می‌شود و امکان انجام عملیات بتن‌ریزی و حفاری بدون تداخل با یکدیگر و به صورت همزمان را فراهم می‌کند که منجر به کاهش زمان و هزینه ساخت و افزایش کیفیت در بتن‌ریزی در فضاهای زیرزمینی می‌گردد. قالب‌های معلق مانند دال‌های ورق فولادی، وزن بتن عمل‌آوری نشده را به تیرهای سازه و سپس به ستون‌های اصلی منتقل می‌کند و بنابراین نیازی به استفاده از جک در زیر دال پیش از عمل‌آوری بتن وجود ندارد. روش ساخت از بالا می‌تواند با ایجاد بازشوهای متعدد جهت

استخراج خاک حفاری شده و در نتیجه با وقفه کمتری انجام گردد. از دیگر راه‌های بهبود عملیات، ساخت جزیره‌ای است؛ به این معنا که در حالی که مناطق حاشیه‌ای به روش ساخت از بالا اجرا می‌گردد، هسته مرکزی سازه به صورت معمول پایین به بالا اجرا گردد. استفاده از روش ساخت از بالای ناقص نیز کاهش زمان ساخت و سهولت اجرا را در پی دارد، به این ترتیب که دال‌های سازه بعد از اجرای اسکلت، دیوار حائل و فونداسیون از پایین به بالا اجرا می‌شود. در روش ساخت از بالای ناقص چنانچه فشار جانبی خاک زیاد باشد، احتمال غیراقتصادی شدن پروژه با افزایش ضخامت دیوار حائل وجود دارد، بنابراین در گودبرداری با اعماق زیاد با انجام مهندسی ارزش باید لزوم استفاده یا عدم استفاده از دال‌های میانی به منظور انتقال بخشی از فشار جانبی گود در حین حفاری مورد بررسی قرار گیرد.

کنترل تغییرشکل در حفاری فضاهای زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. ابزارگذاری و پایش، روشی مناسب در پیش‌بینی روند تغییرشکل‌های زمین است. در مطالعه ایکوتا^۲ و همکاران، اجرای مشاهده‌ای در حفاری با استفاده از ابزارگذاری پیشنهاد گردید؛ به این معنی که مراحل ساخت در حین رفتارنگاری اصلاح می‌گردد و بهینه می‌شود [۱۲]. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی حسگرها و مطالعات عددی، زنجیره اندازه‌گیری و کالیبراسیون مدل عددی با فعالیت‌های میدانی و پیش‌بینی تغییرشکل با استفاده از مطالعات عددی را کامل می‌کند [۱۳]. در مدل‌سازی عددی، تعداد و نوع پارامترهای ورودی بستگی به مدل رفتاری مورد استفاده برای خاک، شرایط تنش، مشاهدات میدانی و نوع مطالعات عددی دارد [۱۴]. بنابراین تعیین تغییرشکل جانبی و نشست زمین مجاور گود تا حد زیادی به کیفیت، دقت و نوع پایش صورت گرفته بستگی دارد.

²- Ikuta

گرفته است. با انجام مطالعات میدانی، امکان کالیبراسیون مدل عددی و پیش‌بینی روند تغییر شکل با استفاده از مدل‌سازی عددی فراهم می‌گردد. هدف از این مقاله، کنترل تغییر شکل‌های به‌وجود آمده با استفاده از مطالعات میدانی، کالیبراسیون مدل عددی و پیش‌بینی روند تغییر شکل‌ها به منظور بازبینی طرح در مقاطع حساس با بهره‌گیری از مطالعات عددی است.

۲- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، شناسایی خاک محل با انجام مطالعات صحرایی و آزمایشات آزمایشگاهی انجام شده است. به منظور مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی سه گمانه به عمق ۲۱ متر در سایت مورد مطالعه حفاری شد. مطالعات ساختگاهی تا عمق ۲۱ متری زمین نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه از چهار لایه تشکیل شده است. گودبرداری پروژه موجود تا عمق ۱۰ متری انجام می‌شود که شن و ماسه به همراه لای، عمده تشکیلات ساختگاهی تا این عمق می‌باشد. لایه اول، لایه با شن بد دانه‌بندی شده به همراه ماسه به ضخامت چهار متر است و لایه دوم متشکل از ماسه همراه با لای با ضخامت شش متر می‌باشد. خاک در این ناحیه فاقد چسبندگی و نسبتاً متراکم است. متوسط عدد نفوذ استاندارد در لایه اول حدود ۳۵ و زاویه اصطکاک داخلی آن ۳۲ درجه می‌باشد. همچنین در لایه دوم نتیجه آزمایش نفوذ استاندارد و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب حدود ۲۰ تا ۲۸ ضربه در ۳۰ سانتیمتر نفوذ و ۳۰ درجه است. وزن مخصوص خاک در چهار متر بالایی حدود $1/9 \text{ gr/cm}^3$ و در لایه ماسه‌ای حدود $1/6 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد. با توجه به اینکه پروژه مورد مطالعه در مسیر رودخانه قمرود واقع است احتمال برخورد با بولدر و قطعات سنگی بزرگ نیز در این محدوده وجود دارد. لوگ یکی از گمانه‌های حفاری شده در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ مشاهده می‌شود [۲۳].

در تعیین ابزار پایش، فاکتورهای زیادی از جمله روش پایدارسازی گود، شرایط هندسی، شرایط جوی، نوع مطالعات عددی، بودجه تعیین شده برای انجام مطالعات و سهولت استفاده از ابزار، تأثیرگذار می‌باشد. استفاده از ابزار کاربردی مناسب نیازمند شناسایی محدودیت‌ها، ویژگی‌ها، معایب و مزایا است. دوربین توتال استیشن امکان پایش جابه‌جایی تعداد نقاط زیادی را در مدت زمان کم فراهم می‌نماید. این ابزار از لحاظ اقتصادی بسیار مناسب می‌باشد و کاربری آن در مقایسه با دیگر ابزار پایش بسیار ساده است. محققین زیادی در سالیان اخیر در مطالعات خود از این ابزار به‌منظور پایش جهت رفتار نگاری به شیوه‌های مختلف بهره برده‌اند و دقت این ابزار در مطالعات مختلف بسته به شیوه پایش، نوع ابزار مورد استفاده، ناپایداری شرایط جوی و شرایط محیطی، کیفیت و نوع منشور و تسلط و دقت اپراتور بین ۰/۰۱ تا ۱۰ میلی‌متر متغیر است [۱۵-۲۱]. در استفاده از دوربین توتال استیشن جهت پایش جابه‌جایی دیواره گود، جابه‌جایی نسبی نقاط مرجع باید پیوسته صفر باشد، بنابراین از این موضوع می‌توان برای بررسی صحت و دقت اطلاعات به‌دست آمده استفاده نمود [۲۲]. روش دیگر برای کنترل صحت اطلاعات به‌دست آمده از دوربین، پایش نقاط از روی چندین ایستگاه است؛ فاصله نقاط تعیین شده در گود تا نقاط مرجع در هر دوره از پایش از ایستگاه‌های مختلف باید نتایج یکسانی داشته باشد.

در تحقیق حاضر به بررسی پایدارسازی گود با استفاده از سازه اصلی به روش ساخت از بالا در محیط پرتدد شهری و در مجاورت سازه‌های حساس پرداخته شده است که در آن تغییر شکل به‌وجود آمده در حفاری مورد پایش قرار می‌گیرد. پایش تغییر شکل دیواره گود در حین انجام عملیات گودبرداری و نصب سیستم مهارتی که حدود پنج ماه به طول انجامید، با به‌کارگیری دوربین توتال استیشن TS02 و با استفاده از منشور برچسبی تعبیه شده بر روی نقاط از پایش تعیین شده، صورت

ناحیه حدود 0.1 kg/cm^2 و زاویه اصطکاک در محدوده ۲۷ درجه است. عدد نفوذ استاندارد در این ناحیه در محدوده ۱۷ تا ۲۱ می‌باشد که گواه از وجود خاک رسی سفت می‌دهد. در عمق ۱۶ تا ۲۱ متر، زمین از جنس ماسه به همراه لای و رس تشکیل شده است. حد روانی و اندیس خمیری در این ناحیه به ترتیب حدود ۲۵ درصد و صفر تا ۷ درصد، چسبندگی خاک حدود 0.1 kg/cm^2 و زاویه اصطکاک در محدوده ۲۸ درجه است (جدول ۱).

همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، جنس زمین در ناحیه تحتانی بستر گود از عمق ۱۰ تا ۱۶ متری از رس با پلاستیسیته کم تشکیل شده است و ماسه به همراه رس و لای عمده تشکیلات زمین از عمق ۱۶ متری تا ۲۱ متری می‌باشد. حد روانی و اندیس خمیری در ناحیه رسی به ترتیب در محدوده ۲۲ تا ۲۹ درصد و ۶ تا ۱۰ درصد می‌باشد. انجام آزمایش برش مستقیم بر روی خاک رسی نشان می‌دهد که چسبندگی خاک در این

جدول ۱- لوگ شناسایی خاک محل [۲۳].

پارامترهای مقاومتی		وزن مخصوص					طبقه بندی			شناسایی نوع خاک	
برش مستقیم		SPT	خشک	رصد رطوبت	حدود اتربرگ		اندازه دانه‌ها			لایه بندی	شماره
c kg/cm ²	Φ Deg	N	γ _d (gr/cm ³)	w%	PI	LL	U ₆₀ (%)	U ₄₀ (%)	U ₂₀ (%)		
		۳۵	۱/۸۳	٪۲/۱۲	NP	-	۱/۷	۳۲/۵	۶۵/۸	W, Well-graded Grav with Sand	۲
صفر	۳۲	۳۵	۱/۹	٪۲/۳۷	NP	-	۰/۴	۱۳/۷	۸۵/۹	GP, Poorly Graded Gravel	۴
		۳۰	۱/۷	٪۹/۵	NP	-	۸/۵	۳۴/۳	۵۷/۲	SW-SM	۶
		۲۰	۱/۴۸	٪۱۶/۷	NP	-	۷۸/۲	۲۷/۸	صفر	ML	۸
صفر	۳۰	۲۷	۱/۷۴	٪۳/۱۶	NP	-	۱۶/۵	۴۷/۵	۳۶	SM	۱۰
		۲۱	۱/۵۴	٪۱۵/۳	٪۹/۸	٪۲۸/۹	۸۷/۶	۱۲/۴	صفر	CL, Lean Clay	۱۲
		۱۸	۱/۵۶	٪۱۴/۹	٪۷/۶	٪۲۲/۹	۶۵/۶	۳۴/۴	۰/۱	CL, Sandy Lean Clay	۱۴
۰/۱	۲۷	۱۹	۱/۴۸	٪۱۶/۵	٪۵/۶	٪۲۶/۵	۸۶	۱۴	صفر	CL-ML, Silty Clay	۱۶
		۱۷	۱/۴۷	٪۱۶/۸	NP	-	۷۵/۱	۲۱/۵	۳/۴	ML	۱۸
۰/۱	۲۸	۲۲	۱/۵۶	٪۱۲/۵	٪۶/۸	٪۲۳/۷	۴۴/۹	۵۲/۵	۲/۶	SC-SM	۲۰
											۲۱

سطح ایستایی در محدوده مسیر تونل مترو به طور متوسط در حدود ۳۰ متر است [۲۴]. پروژه مورد مطالعه در این مقاله در یکی از خیابان‌های پرتردد و در محدوده مسیر تونل مترو واقع شده است که وجود بافت فرسوده و ساختمان پنج طبقه در مجاورت گود اهمیت مطالعات

با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در شهر قم پایین می‌باشد، گمانه‌های حفاری شده در سایت مورد مطالعه تا عمق ۲۱ متری به آب نرسیدند. با توجه به گزارش هیدروژئولوژی شرکت مشاور ساحل در مطالعات طراحی مرحله اول پروژه مترو قم در شهریور سال ۱۳۹۰

است. انجام عملیات فوق نیاز به جانمایی دقیق ستون‌ها پیش از حفاری، مهارت و تجربه بسیار بالا در حین حفاری و رعایت نکات ایمنی دارد.

همانطور که ذکر شد پایش تغییرشکل سازه نگهبان گود، با به‌کارگیری دوربین توتال استیشن TS02 و با استفاده از منشور برچسبی تعبیه شده بر روی نقاطی که تغییرشکل آن‌ها حائز اهمیت بوده، انجام می‌شود. مکانیزم کار به این صورت است که بعد از تعیین نقاط مورد نظر، نقاط مرجعی نیز انتخاب می‌شوند که تغییرشکل نقاط درون گود با استفاده از آن نقاط مرجع مورد پایش قرار می‌گیرد. فرض بر این است که در نقاط مرجع در طول پروسه حفاری و احداث سازه نگهبان تغییرشکلی به وجود نمی‌آید. بنابراین نقاط مرجع باید نقاط ثابتی باشند و به اندازه کافی از گود مورد مطالعه فاصله داشته باشند تا تحت تأثیر عملیات حفاری و احداث سازه نگهبان قرار نگیرند. از آنجاکه در هنگام تعیین نقاط مرجع، باید در نظر داشت که با افزایش فاصله نقاط، خطای اندازه‌گیری نیز افزایش می‌یابد، نقاط مرجع در فاصله معقولی از سایت مورد مطالعه تعیین شده‌اند. نکته دیگری که مورد توجه قرار گرفته است در دسترس بودن نقاطی می‌باشد که تغییرشکل آن‌ها حائز اهمیت است. این نقاط در تمام مدت حفاری و احداث سازه نگهبان به خوبی قابل رؤیت بوده و امکان پایش آن‌ها با استفاده از دوربین توتال استیشن وجود داشته است. ایستگاه‌های دوربین تا حد امکان به‌گونه‌ای انتخاب شده که زاویه دید دوربین، عمود بر منشورهای برچسبی باشد تا عملیات پایش با خطای کمتری مواجه شود. همچنین در طول قرائت نقاط، شاقولی، دوربین پیوسته کنترل شده است تا دوربین در حین قرائت دچار لغزش و یا جابه‌جایی نشود. با توجه به اینکه فاصله نقاط مرجع از یکدیگر پیوسته ثابت است، بنابراین چنانچه فاصله دو نقطه مرجع دچار تغییر جدی شود به معنای آن است که یا دوربین در حین قرائت از

صورت گرفته را تبیین می‌نماید. شایان ذکر است که در طول مدت زمان گودبرداری در این پروژه، حفاری تونل مترو به محدوده سایت مورد مطالعه نرسیده است و بنابراین مسیر تونل مترو تأثیری در این پروژه ندارد.

۳- داده‌ها و روش تحقیق

سازه مورد مطالعه دارای سه طبقه زیرزمین در داخل محدوده شهر قم می‌باشد. براساس مطالعات صورت گرفته و طراحی انجام شده در این پروژه، بعد از تعیین محل دقیق ستون‌ها، چاههایی به صورت دستی تا تراز پایین‌تر از طبقه منفی سه با در نظر گرفتن ضخامت فونداسیون سازه و طول شمع زیر ستون‌ها حفر شده و بعد از جانمایی شبکه میلگرد داخل چاه و قرار دادن ستون فلزی داخل شبکه میلگرد، بتن شمع ریخته می‌شود. سپس چاه‌های حفر شده مجدداً از خاک موجود و یا ترجیحاً با مخلوط درشت دانه پر شده تا پایداری ستون‌ها تأمین شود. بعد از آن قاب‌های سازه روزمینی اجرا گشته و با در نظر گرفتن مسیرهایی برای عبور و مرور ماشین‌های حفاری، متوالیا اقدام به حفاری به عمق‌های حدود دو تا سه متری به صورت یک دهانه در میان شده و دیوار حائل پیرامونی گود نصب می‌شود. همچنین در ادامه و به مرور، قاب‌های سازه زیرزمینی نیز نصب می‌گردد. با توجه به آنکه دیوارهای حائل پیرامونی از جنس بتن مسلح است، حفاری مقداری بیش از ارتفاع دیوار برای تعبیه نمودن میلگرد انتظار در ترازهای پایین‌تر صورت گرفته و این مقدار قبل از بتن ریزی مجدداً با خاک محل پوشیده می‌شود، این کار تا رسیدن به تراز فونداسیون ادامه می‌یابد. با رسیدن به تراز فونداسیون، فونداسیون سازه بسته شده و دیوارهای حائل پیرامونی داخل فونداسیون قرار داده می‌شود و به صورت یکپارچه بتن‌ریزی می‌گردد. نهایتاً سقف‌های سازه با استفاده از دال‌های معلق ورق فولادی از پایین به بالا اجرا می‌شود. به این ترتیب در حین حفاری گود، اسکلت سازه نیز به مرور تکمیل شده

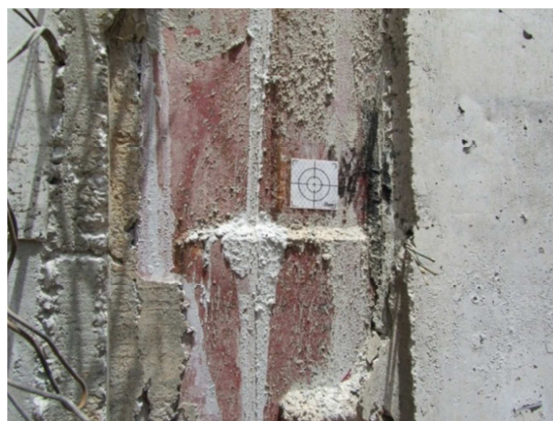
با توجه به نتایج پایش، امکان کالیبره نمودن مدل عددی با مطالعات میدانی به منظور پیش‌بینی روند تغییرشکل‌ها وجود دارد. در این پژوهش، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پلکسیز^۴ دوبعدی انجام شده است. همچنین به منظور اطمینان از نتایج به‌دست آمده از مدل عددی، از نتایج مطالعات ژانگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۵، جهت صحت‌سنجی نرم‌افزار استفاده شده است [۲۶]. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده از مدل عددی در این تحقیق، تطابق بسیار خوبی با نتایج ژانگ و همکاران دارد و این بیانگر آن است که صحت‌سنجی نرم‌افزار به خوبی انجام پذیرفته است. در این پژوهش، با توجه به محدود بودن پارامترهای آزمایشگاهی، مدل رفتاری خاک سخت‌شونده (HS) مورد استفاده قرار گرفته است. گسیختگی در این مدل رفتاری با معیار گسیختگی موهر-کولومب تعریف می‌شود؛ از خصوصیات این مدل، کاهش سختی در برابر بار انحرافی و ایجاد کرنش‌های پلاستیک برگشت ناپذیر است [۲۷-۲۹].

با توجه به وجود یک دهانه ۷/۵ متری در ضلع جنوبی گود، مطالعات بر روی این دهانه به عنوان بلندترین دهانه موجود متمرکز شد. در مطالعات عددی، با بهره‌برداری از تقارن‌های موجود در مساله تنها نیمی از گود در شرایط کرنش صفحه‌ای به صورت دوبعدی مدل شده است. همچنین با توجه به نتایج مطالعات پیشین، محدوده تأثیر گود در مدل‌های اجزای محدود بیش از محدوده مؤثر از گودبرداری تعریف گردید [۳۰].

لازم به ذکر است که از نظر شرایط مرزی، در دو طرف مدل از جابه‌جایی در جهت افقی و در کف مدل از جابه‌جایی در هر دو جهت ممانعت شده است. جهت ساده‌سازی، آرایش پیچیده مهارها در مدل عددی به صورت منظم و با فواصل یکسان، به سختی معادل تبدیل

حالت شاقولی خارج شده و یا منشور تعبیه شده دچار آسیب و یا جابه‌جایی شده است.

مطالعات میدانی این تحقیق طی یک دوره پنج ماهه از دی ماه ۱۳۹۳ تا خرداد ماه ۱۳۹۴ به طول انجامید. مجموعاً تعداد ۲۵ نقطه در گود حفاری شده به روش ساخت از بالا با استفاده از شش نقطه مرجع، مورد پایش قرار گرفت. براساس اسناد ارائه شده توسط کارخانه سازنده، دقت دوربین توتال استیشن TS02 در قرائت با استفاده از منشورهای برچسبی، تا فاصله ۲۵۰ متری، ۵ میلیمتر تعیین شده است [۲۵]. در این پروژه بیشترین فاصله بین دو نقطه، مربوط به نقاط مرجع R1 و R6 حدود ۹۲ متر می‌باشد. با توجه به در دسترس بودن نقاط، عملیات پایش با تسلط مناسبی بر روی نقاط از روی دو ایستگاه قرائت شد. نمونه‌ای از منشورهای برچسبی که بر روی یکی از ستون‌های سازه نگهبان گود تعبیه شده است در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱- تعبیه منشور برچسبی بر روی یکی از ستون‌های سازه نگهبان گود به منظور پایش با دوربین توتال استیشن

عملیات پایش در این پروژه به صورت ۲۰ روز یکبار انجام شده است. اطلاعات به‌دست آمده از دوربین در حین گودبرداری و پایدارسازی گود، با انجام کدنویسی‌های ساده‌ای در نرم‌افزار اکسل^۳ مورد تحلیل قرار گرفته و تغییرشکل نقاط حائز اهمیت در سازه نگهبان به‌دست آمده است.

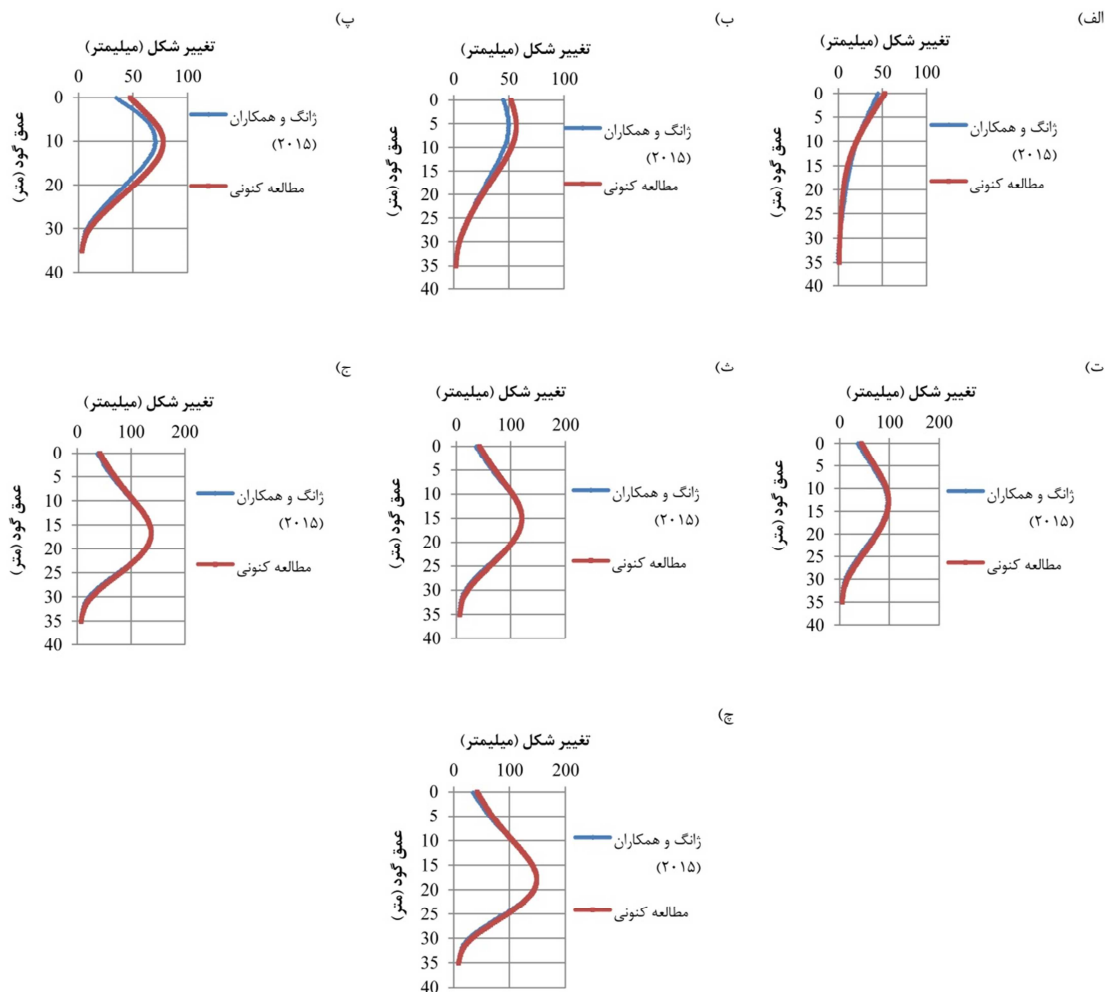
^۴- PLAXIS

^۵- Zhang

^۳- EXCEL

حائز اهمیت بیش‌تری است ریزتر اعمال شد.

شد و شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه با تعریف سه نوع خاک تبیین گردید؛ مش‌بندی در مناطقی که تغییر شکل آن‌ها



شکل ۲- مقایسه تغییر شکل دیوار در مدل عددی کالیبره شده در این مطالعه با مدل ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ در اعماق: الف) ۲ متر، ب) ۵ متر، پ) ۸ متر، ت) ۱۱ متر، ث) ۱۴ متر، ج) ۱۷ متر و چ) ۲۰ متر [۲۶]

تغییر شکل در مطالعات عددی برای ضلع جنوبی گود سیر صعودی داشته باشد و یا تغییر شکل‌ها به حدی ناچیز باشد که اصلاح طرح به اقتصادی شدن پروژه کمک نماید، تمهیدات لازم اعمال می‌گردد.

۴- بحث و بررسی نتایج

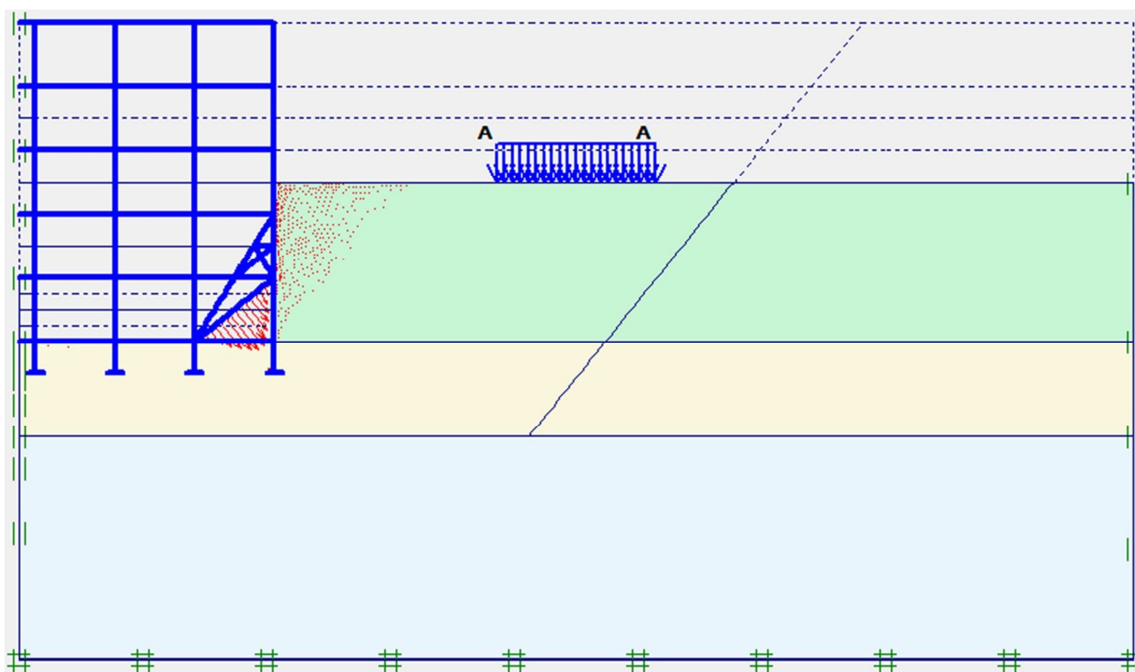
همان‌طور که بیان شد، در این تحقیق در یک دوره پنج ماهه تعداد ۲۵ نقطه در گود با استفاده از ۶ نقطه مرجع مورد پایش قرار گرفت. در طول این زمان، هشت نوبت قرائت صورت گرفت که بعضاً این قرائت‌ها از روی دو یا سه ایستگاه انجام شد. بنابراین داده‌های به‌دست آمده از

در این پژوهش هندسه مدل شده برای ضلع جنوبی گود مطابق با شکل ۳ می‌باشد. همچنین مراحل محاسباتی در مدل عددی مطابق با ۰ در ۱۸ مرحله ارائه شده است. کلیه المان‌های سازه‌ای با استفاده از المان صفحه^۶ در نرم‌افزار پلکسیز مدل شده است.

کالیبراسیون مدل عددی با مشاهدات میدانی در خلال انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای خاک و با پردازش ۷۳ مدل عددی صورت می‌پذیرد. پس از کالیبراسیون مدل عددی، چنانچه پیش‌بینی روند

^۶- Plate

چند ایستگاه با هم مقایسه شده و در حین تحلیل هر دوره از قرائت، صحت‌سنجی شده‌اند.



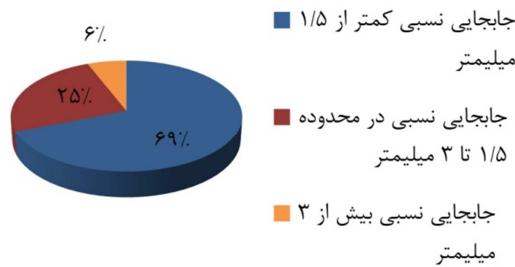
شکل ۳- هندسه مدل‌سازی شده در مدل عددی برای پایدارسازی ضلع جنوبی گود در روش ساخت از بالا

جدول ۲- مراحل محاسباتی در مدل عددی برای پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا در پروژه مورد نظر

مرحله اول	فاز ۱ تا ۴	اعمال بار، نصب ستون‌های سازه به همراه شمع کیسونی، اتصال قاب‌های سازه در تراز +۱۰ متر
مرحله دوم	فاز ۵	حفاری خاک تا تراز ۲- متر
مرحله سوم	فاز ۶	حفاری سه دهانه ابتدایی تا تراز ۴- متر، نصب دیوار حائل پیرامونی تا تراز ۲- متر
مرحله چهارم	فاز ۷	نصب قاب‌های سه دهانه انتهایی در تراز +۶ متر
مرحله پنجم	فاز ۸ و ۹	حفاری سه دهانه ابتدایی تا عمق ۶- متر و دهانه چهارم تا عمق ۴- متر
مرحله ششم	فاز ۱۰	نصب دیوار حائل تا تراز ۶- متر
مرحله هفتم	فاز ۱۱ و ۱۲	حفاری دهانه انتهایی تا عمق ۶- متر، نصب قاب‌ها برای دو دهانه انتهایی در تراز +۲ متر
مرحله هشتم	فاز ۱۳	حفاری تا تراز ۷- متر تا جلو یال خرپای بزرگ
مرحله نهم	فاز ۱۴	نصب قاب‌ها برای دو دهانه انتهایی در ترازهای ۲- و ۶- متر
مرحله دهم	فاز ۱۵	حفاری سه دهانه ابتدایی تا عمق ۸- متر، نصب دیوار حائل تا تراز ۱۰- متر
مرحله یازدهم	فاز ۱۶ و ۱۷	حفاری دو دهانه ابتدایی تا عمق ۱۰- متر و دهانه انتهایی تا جلو یال خرپای کوچک تا تراز ۸- متر
مرحله دوازدهم	فاز ۱۸	نصب یال خرپای کوچک
مرحله سیزدهم	فاز ۱۹ و ۲۰	حفاری خاک جلو یال خرپای کوچک تا عمق ۱۰- متر
مرحله چهاردهم	فاز ۲۱ و ۲۲	حفاری خاک پشت یال خرپای کوچک تا عمق ۱۰- متر
مرحله پانزدهم	فاز ۲۳	ریختن فونداسیون دو دهانه انتهایی
مرحله شانزدهم	فاز ۲۴	تکمیل اسکلت سازه و مقاوم سازی دیواره گود
مرحله هفدهم	فاز ۲۵	آنالیز پایداری

نمود. برای این منظور، میانگین فاصله نسبی نقطه‌های مرجع با نام‌های R1 تا R6 براساس ۱۱۵ داده موجود محاسبه شده‌اند و در نتیجه مقادیر واریانس و انحراف

در تحلیل هشت نوبت قرائت انجام شده، نقاط مرجع، ۱۱۵ مرتبه نسبت به یکدیگر اندازه‌گیری شدند که با استفاده از آن می‌توان دقت دوربین توتال را ارزیابی



شکل ۴- درصد پراکندگی جابه‌جایی نسبی نقاط مرجع

با توجه به مطالب ارائه شده، مطالعات میدانی با دقت مناسبی انجام شده است و فرصت مناسبی را برای کالیبراسیون مدل عددی جهت پیش‌بینی روند تغییرشکل‌ها ایجاد می‌کند. برای این منظور بلندترین دهانه سازه که در وسط دیواره گود در ضلع جنوبی واقع است، تارگت‌گذاری، پایش و مدل شده است. عملیات پایش در این دهانه ۷/۵ متری با استفاده از هفت تارگت در ترازهای +۱، -۴ و -۷/۵ انجام پذیرفته است. براساس اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات میدانی، مقدار متوسط تغییرشکل در این دهانه در سه تراز فوق با توجه به زمان ساخت تا پایان عملیات حفاری و پایدارسازی، در شکل ۵ ارائه شده است.

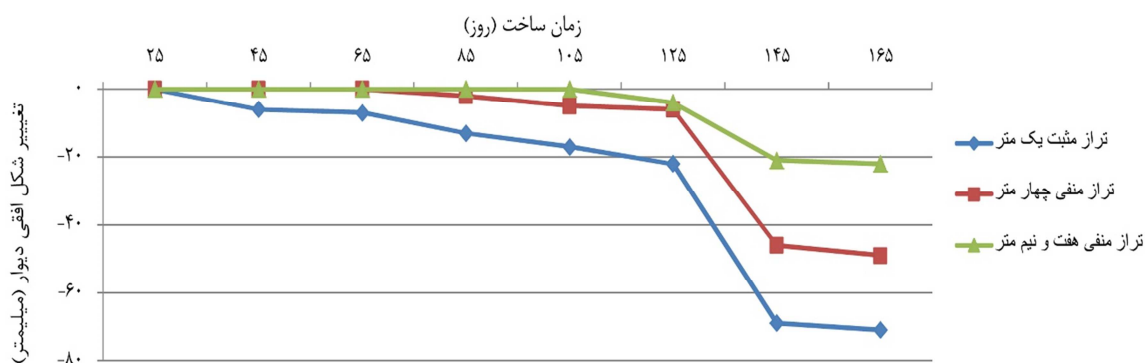
به منظور کالیبراسیون مدل عددی با نتایج میدانی، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی صورت گرفته است. در آنالیز حساسیت صورت گرفته برای مدل عددی، فواصل افقی و قائم مهاریها، سختی مهاریها و هندسه گود، پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. بنابراین آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی شامل مدول الاستیسته سکانت در تنش ۵۰٪ (E)، زاویه اصطکاک (φ)، چسبندگی (c)، پارامتر توانی (m) و تراز کف مدل (T) انجام شد؛ سایر پارامترها براساس مقادیر پیش‌فرض در نرم‌افزار پلکسیز برای مدل خاک سخت‌شونده در نظر گرفته شده است. همچنین سختی کاهش یافته خاک اطراف ستون‌ها ناشی از دست خوردگی خاک هنگام جای‌گذاری ستون به‌صورت یک ضریب کاهش در سختی ستون اعمال شد که جزو متغیرهای آنالیز حساسیت در نظر گرفته شد.

معیار (b) برای داده‌های موجود مطابق با جدول ۳ به دست آمده است.

جدول ۳- میانگین و انحراف معیار فاصله نسبی نقاط مرجع

جابه‌جایی نسبی نقاط مرجع (میلی‌متر)				
انحراف معیار (b)	واریانس	میانگین (Ave)	تعداد کل داده‌ها	
۲/۳	۵/۱	۹۱۸۳۸/۷	۱۱	R1R6
۲/۳	۵/۱	۸۸۳۷۰/۹	۸	R2R6
۲/۴	۵/۶	۸۸۸۱۳/۳	۷	R3R6
۱/۲	۱/۴	۵۷۲۶۵/۲	۱۰	R4R6
۱/۵	۲/۲	۵۵۵۱۰	۹	R5R6
۱/۷	۲/۹	۴۶۴۱۵/۳	۸	R1R5
۰/۷	۰/۶	۳۴۴۳۷/۲	۵	R2R5
۱/۱	۱/۲	۳۳۵۲۲/۳	۴	R3R5
۱/۳	۱/۸	۲۰۰۷۳/۵	۸	R4R5
۱/۵	۲/۲	۳۴۷۶۹/۶	۱۰	R1R4
۱/۴	۲	۳۴۴۷۵/۶	۷	R2R4
۱/۶	۲/۵	۳۸۱۵۸/۲	۶	R3R4
۱/۲	۱/۶	۳۱۸۵۷/۹	۷	R1R3
۰/۶	۰/۴	۸۲۲۷/۱	۷	R2R3
۱/۵	۲/۲	۲۳۶۳۲/۸	۸	R1R2

براساس جدول فوق میانگین انحراف معیار داده‌ها برابر با ۱/۵ میلی‌متر به‌دست می‌آید. به این ترتیب از میان ۱۱۵ داده موجود، جابه‌جایی نسبی برای ۷۹ داده در محدوده صفر تا ۱/۵ میلی‌متر ثبت شده است، جابه‌جایی نسبی ۲۹ داده در محدوده ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر است و تنها ۷ داده جابه‌جایی نسبی بیش از ۳ میلی‌متر از خود نشان می‌دهد. بنابراین مطابق با شکل ۴ درصد متناظر هریک از این محدوده‌ها به ترتیب ۶۹٪، ۲۵٪ و ۶٪ می‌باشد. در نتیجه ۹۴٪ داده‌ها در محدوده دو برابر انحراف معیار (2b) قرار دارد. بر این اساس می‌توان مدعی شد که دقت ابزار مورد استفاده در این مطالعه با توجه به فواصل نقاط مورد پایش ۳ میلی‌متر بوده و لذا اطلاعات به‌دست آمده از دوربین توتال استیشن TS02 در این پژوهش با دقت خوبی جمع‌آوری شده است.



شکل ۵- میزان متوسط تغییرشکل دیوار ضلع جنوبی در وسط دهانه ۷/۵ متری در سه تراز +۱، -۴ و -۷/۵ متر نسبت به تراز خیابان در طول مدت حفاری و پایدارسازی گود

تأثیرگذار هستند و پارامتر $\phi 2$ با اهمیت نسبی ۲٪ کم‌تأثیرترین پارامتر تشخیص داده شد.

بعد از انجام آنالیز حساسیت، ۳۳ مدل فرضی جهت ایجاد رابطه‌ای برای تخمین تغییرشکل براساس پارامترهای ورودی پردازش شد. براساس مدل‌های فرضی پردازش شده، پارامترهایی که با نتایج کلی همگرایی نداشتند کنار گذاشته شدند؛ نهایتاً با کنار گذاشتن پارامترهای $c1$ و $c2$ و با توجه به نتایج مدل‌های فرضی پردازش شده مطابق با شکل ۶ رابطه‌ای برای تخمین تغییرشکل به‌دست آمد. معادله زیر این رابطه را نشان می‌دهد:

$$\delta_{h-\max} = 0.155E_1 + 42.67\phi_1 + 6.689E_2 + 0.13\phi_2 + 2.68R - 89.4 \quad (1)$$

رابطه (۱)، یک رگرسیون چندجمله‌ای است که با متغیر قرار دادن پارامترهای $E1$ ، $E2$ ، $\phi 1$ ، $\phi 2$ و R ، تغییرشکل حداکثر جانبی دیوار را با دقت خوبی و بدون نیاز به پردازش مدل عددی جدیدی تخمین می‌زند. نتایج آنالیز حساسیت و رابطه به‌دست آمده در کالیبراسیون مدل عددی در این مطالعه نقش بسزایی داشت.

با انجام آنالیز حساسیت، مدل عددی براساس نتایج به‌دست آمده از مطالعات میدانی تا یکصد و پنجمین روز از عملیات حفاری و پایدارسازی گود، یعنی با رسیدن تراز گود به عمق ۶- متر، کالیبره شد. در این شرایط، مطابق با شکل ۵ و شکل ۷، مطالعات عددی مقدار تغییرشکل را

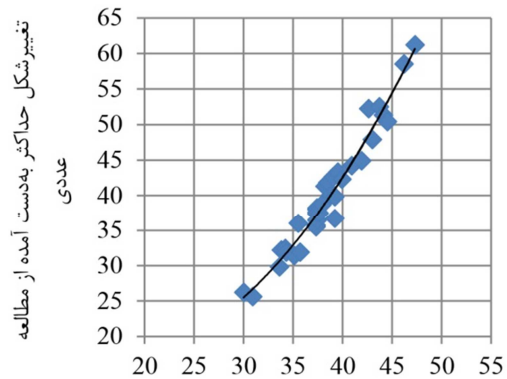
جهت سهولت در تحلیل نتایج و با توجه به متغیر قرار گرفتن پارامترهای ژئوتکنیکی، شرایط ساختگاهی در آنالیز حساسیت شامل دو نوع خاک در نظر گرفته شد؛ به این ترتیب که ساختگاه اول شرایط پروژه تا بستر گود و ساختگاه دوم شرایط پروژه از بستر گود تا کف مدل را توصیف می‌کند. پارامترهای ژئوتکنیکی که با شماره ۱ مشخص شده‌اند مربوط به لایه اول و پارامترهای ژئوتکنیکی که با شماره ۲ مشخص شده‌اند مربوط به لایه دوم می‌باشد. در این مطالعه، آنالیز حساسیت با پردازش ۷۳ مدل عددی صورت گرفت؛ حساسیت مدل نسبت به هریک از پارامترهای ژئوتکنیکی در ۴۰ مدل ابتدایی مورد بررسی قرار گرفت و سپس سعی بر ایجاد رابطه‌ای برای تخمین تغییرشکل با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت با استفاده از ۳۳ مورد مطالعاتی فرضی دیگر شد. براساس نتایج به‌دست آمده از مطالعات پارامتری، پارامترهایی که از الگوی منطقی‌ای پیروی نمی‌کردند، کنار گذاشته شدند و سایر پارامترها مورد ارزیابی قرار گرفتند. به این ترتیب پارامتر توانی m و تراز کف مدل (T) به علت الگوی غیرمنطقی کنار گذاشته شدند. بر این اساس، حساسیت مدل به پارامترهای ژئوتکنیکی مورد بحث، براساس اهمیت نسبی آن‌ها مرتب شد. پارامتر $\phi 1$ با اهمیت نسبی ۴۲/۲٪، مهم‌ترین پارامتر در مدل عددی ایجاد شده است، پس از آن پارامترهای $c2$ ، $E2$ ، R ، $c1$ و $E1$ به ترتیب با اهمیت نسبی ۱۷/۱٪، ۱۶/۷٪، ۱۰/۶٪، ۸/۵٪ و ۲/۶٪ در این مدل عددی

می‌شود تا روند صعودی تغییرشکل جانبی در این وجه متوقف گردد و از وقوع حوادث فجیع‌تر جلوگیری به عمل آید. روند تغییرشکل‌ها در مدل عددی تا عمق ۱۰- متر در حالتی که از المان تقویتی در وسط دهانه ضلع جنوبی گود استفاده شده باشد، مطابق با نمودارهای شکل ۷ پیش‌بینی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با پیشروی عملیات حفاری و پایدارسازی به اعماق پایین‌تر (۱۴۵ و ۱۶۵مین روز ساخت) به تدریج تغییرشکل در قسمت تاج گود افزایش می‌یابد. مطابق با پیش‌بینی مدل عددی با وجود مقاوم‌سازی انجام شده، حرکت به وجود آمده در توده خاک و توسعه توده گسیخته شده باعث تغییرشکل‌های بزرگ در این وجه از گود می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار تغییرشکل در پایان عملیات حفاری، پایدارسازی و تکمیل اسکلت سازه در تراز +۱، -۴ و -۷/۵- متر به ترتیب ۶۲، ۴۴ و ۲۱ میلی‌متر پیش‌بینی شده است و حداکثر تغییرشکل جانبی دیوار در تراز در حدود ۲/۵+ متر اتفاق افتاده است. از طرفی، پس از انجام عملیات حفاری و پایدارسازی تا عمق ۱۰- متر و مقاوم‌سازی دهانه ۷/۵ متری، مطالعات میدانی با استفاده از دوربین توتال استیشن مقادیر تغییرشکل را برای این سه تراز در انتهای کار به ترتیب ۷۱، ۴۹ و ۲۲ میلی‌متر ثبت کرده است. سرعت گرفتن عملیات اجرایی در مراحل پایانی، حفاری حجم بیشتری از خاک در گام‌های خاکبرداری و عدم انتقال بارهای جانبی وارد بر دیوارهای محیطی در وجه جنوبی گود به نقطه‌ای پایدار منجر به ثبت مقادیر بزرگتری از تغییرشکل در پایش‌های میدانی نسبت به پیش‌بینی‌های مطالعات عددی در مراحل بعدی عملیات حفاری و پایدارسازی وجه جنوبی گود شد.

انجام مطالعات میدانی، کالیبراسیون مدل عددی و پیش‌بینی مقادیر تغییرشکل در انتهای عملیات حفاری و پایدارسازی در این مطالعه پیمانکار را نسبت به عواقب فاجعه‌بار آن آگاه نمود. به این ترتیب با انجام مقاوم‌سازی

برای دیوار در ترازهای ۱+ و ۴- متر به ترتیب برابر با ۱۶- و ۵- میلی‌متر محاسبه نموده است که با مقادیر ثبت شده در پایش‌های میدانی برابر است.



شکل ۶- تخمین تغییرشکل با بهره‌گیری از رگرسیون چندجمله‌ای

با کالیبره نمودن مدل، امکان پیش‌بینی روند تغییرشکل‌ها در ادامه عملیات فراهم می‌شود. به این ترتیب با استفاده از مدل کالیبره شده، ادامه فرایند حفاری و پایدارسازی تا عمق ۱۰- متر مدل‌سازی شد. مدل عددی نشان می‌دهد، ادامه عملیات حفاری و پایدارسازی تا عمق ۱۰- متر منجر به وقوع تغییرشکل پیش‌رونده در این مقطع از گود می‌شود و گسیختگی توده عظیمی از خاک در وجه جنوبی گود را به دنبال دارد که منجر به ناپایداری وجه جنوبی گود می‌گردد. لذا با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل لزوم مقاوم‌سازی دهانه ۷/۵ متری با استفاده از المان‌های تقویتی به منظور کنترل میزان تغییرشکل در ادامه عملیات حفاری و پایدارسازی برای پیمانکار روشن می‌شود. بنابراین، مقاوم‌سازی این دهانه توسط پیمانکار جهت کنترل روند تغییرشکل با استفاده از المان‌های تقویتی مورد توجه قرار گرفت.

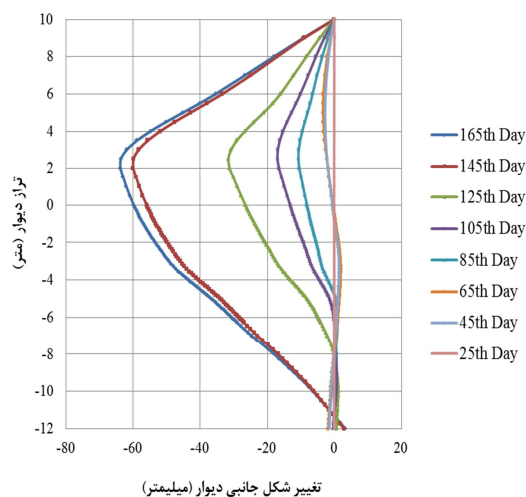
روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی این مقطع در نظر گرفته شد و در مدل کالیبره شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از مطالعات عددی نشان می‌دهد، استفاده از المان قائم در وسط دهانه، متکی به مهارهای موربی که در پی سازه مدفون باشند باعث

۵- نتیجه‌گیری

براساس تحلیل نتایج و مطالعات آماری انجام شده بر روی ۱۱۵ داده موجود از فاصله نسبی نقاط مرجع در پایش پایدارسازی یک گود به روش ساخت از بالا با استفاده از دوربین توتال استیشن، جابه‌جایی نسبی برای ۶۹٪ داده‌ها کمتر از ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد، ۲۵٪ از داده‌های موجود دارای جابه‌جایی نسبی در محدوده ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر است و تنها ۶٪ از داده‌ها جابه‌جایی بیشتر از ۳ میلی‌متر دارد، بنابراین جابه‌جایی نسبی نقاط مرجع برای ۹۴٪ داده‌ها کمتر از ۳ میلی‌متر است که نشان از کیفیت خوب مطالعات میدانی در جابه‌جایی‌های ثبت شده برای زمین دارد. البته لازم به ذکر است که در گودبرداری‌های با خطر زیاد، باید از روش‌های کارآمدتر و دقیق‌تری که با خطای کمتری همراه است برای ثبت جابه‌جایی‌های زمین استفاده نمود.

مطالعات عددی در این پژوهش، با استفاده از پایش‌های میدانی با دقت خوبی کالیبره شد که منجر به پیش‌بینی تغییرشکل‌ها در مراحل بعدی ساخت گردید؛ بنابراین با به‌کارگیری این روش می‌توان در هر مرحله از حفاری با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات میدانی طرح اجرایی را بنا به صلاحدید جهت افزایش ایمنی و یا اقتصادی نمودن پروژه با تغییراتی همراه نمود. در پایدارسازی گود به روش ساخت از بالا و یا روش‌هایی با مکانیزم مشابه بایستی بارهای جانبی وارد بر دیوارهای محیطی به نحو مطمئنی با استفاده از المان‌های مهارای افقی به نقطه‌ای پایدار نظیر دیوار یا ستون‌های محیطی مقابل منتقل گردد. عدم انتقال بارهای جانبی در دهانه ۷/۵ متری به نقطه پایدار مقابل و تنها اتکا به ستون‌های میانی در پروژه مورد مطالعه در این تحقیق باعث تغییرشکل در توده خاک و ایجاد نقاط پلاستیک پشت دهانه ۷/۵ متری گردید که وقوع تغییرشکل‌های اضافی بیش از حد انتظار را در این مقطع در پی داشت. در عین حال، اصلاح مراحل ساخت با استفاده از

در ضلع جنوبی گود روند صعودی تغییرشکل جانبی در این وجه متوقف گردید، با این وجود افزایش تغییرشکل‌ها در بازه زمانی ۱۲۵ تا ۱۶۵امین روز ساخت منجر به ترک‌خوردگی آسفالت در خیابان مجاور گود و ناشاقولی تعدادی از ستون‌های سازه شد.



شکل ۷- تغییرشکل‌های به‌دست آمده از مدل کالیبره شده در ادامه عملیات حفاری و پایدارسازی ضلع جنوبی گود

با توجه به تخمین‌های به‌دست آمده از مطالعات عددی، نتیجه می‌شود که مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار پلکسیز و با مدل خاک سخت‌شونده، مراحل بعدی ساخت را با دقت خوبی پیش‌بینی نموده است و اصلاح مراحل ساخت در این پروژه با تحلیل نتایج پایش با کیفیت خوبی انجام پذیرفته است. در اجرای عملیات حفاری و پایدارسازی گود به روش ساخت مشاهده‌ای، پیمانکار این قابلیت را دارد که در هر مرحله از حفاری با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات میدانی، طرح اجرایی را بنا به صلاحدید جهت افزایش ایمنی و یا اقتصادی نمودن پروژه با تغییراتی همراه نماید. در این پروژه، رفتارنگاری گود پایدارسازی شده به روش ساخت از بالا، تحلیل به موقع داده‌های به‌دست آمده از نقاط درون گود، تخمین روند تغییرشکل‌ها در مراحل بعدی حفاری و در نتیجه تمهیدات به موقعی که توسط پیمانکار به کار بسته شد، باعث شد تا از وقوع حوادث فجیع‌تر جلوگیری به عمل آید.

بنابراین با توجه به درجه مخاطره‌آمیز بودن گود، استفاده از این روش با به کارگیری ابزار متناسب، در حفاری فضاهای زیرزمینی توصیه می‌شود.

قدردانی

از مؤسسه مهندسی مشاور ساحل و جناب آقای مهندس محمودی که داده‌های مورد نیاز برای انجام این مطالعه را با نهایت سخاوت در اختیار قرار دادند، سپاسگزاری می‌گردد.

رفتارنگاری باعث شد تا از وقوع حوادث فجیع‌تر جلوگیری به عمل آید، به این ترتیب که رصد اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات میدانی، تحلیل نتایج و مدل‌سازی عددی، منجر به ایجاد تغییر در مراحل اجرایی و مقاوم‌سازی وجه جنوبی گود گردید که تغییرشکل پیش‌رونده در این وجه را متوقف نمود.

در این مطالعه فارغ از نوع ابزار پایش به کار گرفته شده و نوع مطالعات عددی پردازش شده، یک روش کارآمد جهت بهینه‌سازی مراحل اجرایی با تکیه بر نتایج پایش‌های میدانی و مطالعات عددی ارائه شده است.

مراجع

- [1] Long, M. (2001), "Database for retaining wall and ground movements due to deep excavation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 203-224.
- [2] Boone, S. J., Westland, J., & Nusink, R. (1999), "Comparative evaluation of building responses to an adjacent braced excavation", *Canadian Geotechnical Journal*, 36(2), 210-223.
- [3] Li, M. G., Chen, J. J., Xu, A. J., Xia, X. H., & Wang, J. H. (2014), "Case study of innovative Top-Down construction method with channel-type excavation", *Journal of Construction Engineering and Management*, 140. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000828
- [4] Moormann, C. (2004), "Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database", *Journal of Japanese Geotechnical Society: Soils and Foundation*, 44(1), 87-98.
- [5] Paek, J. H., & Ock, J. H. (1996), "Innovative building construction technique: Modified Up-Down method", *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(2), 141-146.
- [6] Wang, J. H., Xu, Z. H., & Wang, W. D. (2010), "Wall and ground movement due to deep excavations in Shanghai soft soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7), 985-994.
- [7] Ghavidel Aghdam, O. (2011), "Assessment of underground construction using Top-Down method." *First Asian and 9th Iranian Tunneling Symposium, Iran, Tehran* (In Persian).
- [8] Hong, W. K., Kim, J. M., Lee, H. C., Park, S. C., Lee, S. G., & Kim, S. I. (2010), "Modularized Top-Down construction technique using suspended pour forms (Modularized RC System Downward, MRSD)", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Wiley Online Library, 802-822. DOI: 10.1002/tal.521
- [9] Huang, Z. H., Zhao, X. S., Chen, J. J., & Wang, J. H. (2014), "Numerical analysis and field monitoring on deformation of the semi-Top-Down excavation in Shanghai", *New Frontiers in Geotechnical Engineering*, 198-207.
- [10] Lee, H. S., Lee, J. Y., & Lee, J. S. (1999), "Noneshored formwork system for Top-Down construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(6), 392-399.
- [11] Wang, J. H., Xu, Z. H., Di, G. E., & Wang, W. D. (2006), "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", *Underground Construction and Ground Movement*, 385-392.
- [12] Ikuta, Y., Maruoka, M., Aoki, M., & Sato, E. (1994), "Application of the observational method to a deep basement using the Top-Down method", *Geotechnique*, 44(4), 655-664.
- [13] Finno, R. J. (2007), "Use of monitoring data to update performance predictions of supported excavations", *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, 1-30. DOI: 10.1061/40940(307)3
- [14] Finno, R. J., & Calvello, M. (2005), "Supported excavation: Observational method and inverse modeling", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), 826-836.

- [15] Finno, R. J., & Hassash, Y. M. A. (2006), "Integrating tools to predict monitor and control deformation due to excavations", *Geo Congress*, DOI: 10.1061/40803(187)75
- [16] Song, Y. (1999), "Inspection on the precision of 3D deformation observation by the free stationing method", *Geotech. Investig. Surv.*, 1, 61-63.
- [17] Yang, S. L., Liu, W. N., Wang, M. S., Huang, F., & Cui, N. Z. (2004), "Study on the auto-total station for monitoring analyzing and forecasting tunnel country rock deformation", *Journal of China Railway Society*, 3, 93-97.
- [18] Yuan, H., Liu, C. L., Lu, J., Deng, C., & Gong, S. (2012), "The principle and accuracy analysis of non-contact monitoring for tunnel based on free station of total station", *Geotech. Investig. Surv.*, 8, 63-68.
- [19] Luo, Y., Chen, J., Xi, W., Zhao, P., Qiao, X., Deng, X., & Liu, Q. (2016), "Analysis of tunnel displacement accuracy with total station", *Measurement*, 83, 29-37.
- [20] Sabzi, Z., & Fagher, A. (2013), "A field investigation into the performance of inclined struts connected to adjacent buildings during excavation." *Modares Civil Engineering Journal*, 13(4), 27-43 (In Persian).
- [21] Dunnycliff, J. (1982). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley and Sons, A Wiley Interscience Publications.
- [22] Finno, R. J., & Blackburn, J. T. (2005), "Automated monitoring of supported excavation", *Geotechnical Application for Transportation Infrastructure*, 1-12. DOI: 10.1061/40821(181)1
- [23] Paydar Gostar Soil Mechanics Co. (2013), "Geotechnical investigation report, 10529, 24 and 25" (In Persian).
- [24] Sahel Consultant Co. (2011), "Engineering service for Qom subway project- Line A, Geology studies in determining tunnel direction, SCE 2000 UNGR TUN EG RP-B0" (In Persian).
- [25] Leica Geosystems. (2008). *Leica FlexLine TS02/TS06/TS09 user manual*. Leica Geosystems AG, Heinrich-Wild-Strasse, CH-9435 Heerbrugg, Switzerland, www.leica-geosystems.com
- [26] Zhang, W., Goh, A. T. C., & Xuan, F. (2015), "A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays", *Computers and Geotechnics*, 63, 67-72
- [27] Schanz, T., & Vermeer, P. A. (1998), "On the stiffness of sands", *Geotechnique*, Pre-failure Deformation Behaviour of Geomaterials, Institution of Civil Engineers, Great Britain, 383-387.
- [28] Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G. (1999). *The hardening soil model: Formulation and verification*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics- 10 Years of PLAXIS, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 040 X
- [29] PLAXIS Manual. (2014). *Material models*. PLAXIS publications, www.PLAXIS.nl
- [30] Hsieh, P. G., & Ou, C. Y. (1997), "Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation", *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 1004-1017.

E. Ghorbani

M.Sc. Student, Department of
Civil Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Qom.

e-mail: e.ghorbani@stu.qom.ac.ir

M. Khodaparast*

Associate Professor,
Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Qom.

e-mail: khodaparast@qom.ac.ir

A. Moezi

Lecturer, Department of Civil
Engineering, Faculty of
Engineering, University of
Qom.

e-mail: ghasemmoezi@yahoo.com

**Field Monitoring and Numerical Modeling in
an Excavation Stabilized by Top-Down Method
(A Case Study)**

Stress changes due to deep excavations will cause ground deformations near the excavated site. Deformation control in the vicinity of worn-out urban textures and important buildings is crucially significant. Prediction of ground deformation trends needs numerical modeling which should be calibrated with field studies; therefore, accuracy of monitoring tool should be investigated in the field precisely. In this study, field monitoring and numerical modeling of an excavation stabilized by Top-Down method using total station in an overcrowded street in the city of Qom in Iran is implemented. In this project, construction sequences in Top-down excavation are monitored and the obtained data are analyzed frequently. Depending on the evolved information and the calibrated model, designation or construction stages in stabilization could be reconsidered to secure the excavation or to enhance the economy of the project. The quality of the gathered data in this method is of high importance which should be evaluated using statistical analysis to determine the precision of the monitoring tool. According to the conducted statistical analysis, the accuracy of Total Station in this study is appropriate for monitoring and construction technique in this project. However, using more accurate tools in monitoring high risk excavations is emphasized.

Keywords: Field monitoring, Total Station, Top-Down excavation, Accuracy control, Finite element model.

* Corresponding author