

Investigation of Monitoring Techniques Used in Soil-Nailed Excavations

Alireza Ahadi, Ph.D., Graduate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Sadegh Ghavami, *Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.*

Pourya Khadem, M.Sc., Graduate, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

E-mail: ghavamijamal@sut.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

In urban development processes, deep excavations are frequently carried out for the construction of multi-level basements, railway tunnels, and transportation infrastructure. These excavations create significant challenges for engineers due to the need to protect adjacent structures and urban utilities. Therefore, safe excavation requires the application of appropriate monitoring methods and specialized instrumentation. In this study, based on the results of numerical simulations of a soil nail–stabilized excavation using the finite element method, the effects of excavation depth and width, the presence of problematic soil layers, groundwater conditions, and the existence of displacement-sensitive structures adjacent to the excavation on the design of monitoring systems were investigated. The results indicate that for deep excavations, the installation of a monitoring system is essential. For measuring vertical displacements, the use of extensometers behind the wall or at intermediate columns is recommended, while horizontal displacements should be monitored using inclinometers installed behind the wall or near intermediate columns. In the presence of groundwater, piezometers should be installed behind the excavation wall. Furthermore, when problematic soil layers are present, load cells should be installed on soil nails at the layer boundaries, and strain gauges and inclinometers should be used behind the wall. The dimensions of the excavation do not significantly affect the monitoring results and do not require additional instrumentation.

Keywords: Monitoring, Excavation, Soil Nailing, Finite Element Method

بررسی نحوه پایش گودهای پایدارسازی شده به روش میخ کوبی

مقاله علمی-پژوهشی

علیرضا احدی، دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*صادق قوامی جمال (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
پوریا خادم، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghavamijamal@sut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۴۷۰-۴۵۹

چکیده

در فرآیند توسعه شهری، حفاری‌های عمیق اغلب برای ساخت زیرزمین‌های چند طبقه، تونل‌های راه آهن و راهسازی انجام می‌شود که به دلیل حفاظت از سازه‌ها و زیرساخت‌های مجاور چالش‌هایی را برای مهندسان ایجاد می‌کند. بنابراین جهت گودبرداری ایمن، نیاز به استفاده از روش‌ها و ابزار اندازه‌گیری خاص جهت پایش است. در این تحقیق، براساس نتایج شبیه‌سازی گود پایدارسازی شده به روش میخ‌کوبی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS، تأثیر پارامترهای عمق و عرض گود، وجود لایه خاک مسئله‌دار، آب زیرزمینی و سازه‌های حساس به تغییر مکان در مجاورت گود بر نحوه ارائه طرح پایش، بررسی گردید. نتایج نشان داد که برای گودهای عمیق، استقرار سیستم پایش ضروری است. جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های قائم، استفاده از نشست‌سنج در پشت دیوار یا ستون‌های میانی و جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های افقی، استفاده از انحراف‌سنج در پشت دیوار یا ستون‌های میانی توصیه می‌شود. در صورت وجود آب زیرزمینی باید پیزومتر در پشت دیواره گود نصب شود. همچنین در صورت وجود لایه‌های خاک مسئله‌دار، لازم است در مرز لایه‌ها از نیروسنج در میخ‌ها و در پشت دیواره از کرنش‌سنج و انحراف‌سنج استفاده شود. ابعاد گود تأثیری در نتایج ندارد و نیاز به ابزارگذاری خاصی نیست.

واژه‌های کلیدی: پایش، گودبرداری، میخ‌کوبی، روش المان محدود

۱- مقدمه

احتمالی در آن آگاه شد. با پایش گود نیاز به صرف هزینه‌های زیاد برای حفاری اکتشافی و ترمیم به منظور شناخت نسبی گود نیست و اقدامات لازم در زمان مناسب به منظور جلوگیری از تلفات گرفته می‌شود (Tian et al., 2025). اطلاعات به دست آمده از پایش عموماً جهت برنامه‌ریزی و طراحی فعالیت‌ها، افزایش ایمنی، تأیید فرضیه‌ها، کاهش عدم قطعیت و افزایش اطلاعات در ارتباط با گودبرداری مورد نظر به کار می‌رود (Liu et al., 2022). هزینه‌های بالای نگهداری، دقت پایین در بازرسی چشمی و قابلیت استفاده از حسگرها در محیط، پایش گود را به امری ضروری تبدیل کرده است. استفاده از روش میخ‌کوبی یکی از تکنیک‌های مؤثر جهت پایدارسازی

با رشد جمعیت شهری، ساخت‌وسازهای زیرزمینی و گودبرداری‌های عمیق به منظور بهره‌برداری از فضای بیشتر در حال افزایش است که معمولاً برای ایستگاه‌های مترو، زیرزمین ساختمان‌های بلند، پارکینگ‌های زیرزمینی و مراکز خرید و سایر تأسیسات استفاده می‌شوند. جابجایی زمین ناشی از گودبرداری ممکن است سازه‌ها و زیرساخت‌های مجاور (ساختمان‌ها، تونل‌ها، خطوط لوله مدفون و فونداسیون‌های شمع) را به خطر بیندازد و قابلیت سرویس‌دهی آنها را تحت تأثیر قرار دهد (Tan et al., 2020; Zheng et al., 2022). بنابراین ضروری است با استفاده از پایش گود و ارزیابی داده‌های برخط یا در بازه‌های زمانی معین، از شرایط گود و موقعیت آسیب‌های

۲- مدل سازی عددی

در این تحقیق، از نرم افزار PLAXIS که محاسبات آن بر پایه روش المان محدود است استفاده شد. در این نرم افزار به منظور تخمین تغییر شکل ها و نیروها، روش توالی ساخت (Staged Construction) به کار می رود که در آن می توان کلیه مراحل خاکبرداری و تغییر شکل ناشی از آن را در مدل سازی لحاظ نمود. مرحله اول، آنالیز تنش های برجای خاک است که شرایط تنش مطابق با شرایط در محل را بر مدل اعمال می کند. سپس هر مرحله از خاکبرداری و مراحل اجرای المان های تسلیح به ترتیب در مدل، اعمال شده و در هر بخش، نتایج به دست آمده کانتورهای مختلف تنش، کرنش و جابه جایی ترسیم می شود و سپس توصیه های لازم بر اساس آنالیز نمودارها و بررسی تحقیقات مشابه ابزارگذاری شده در این شرایط، ارائه می گردد. در تحلیل های تغییر شکل، مدل رفتاری خاک سخت شونده (Hardening Soil) در نظر گرفته شد. این مدل رفتاری از نوع غیرخطی الاستوپلاستیک سخت شونده با سخت شوندگی همسان است که برای مدل سازی مصالح خاکی در شرایط استاتیک مناسب است. این مدل رفتاری قابلیت شبیه سازی اثر فشار همه جانبه بر مدول تغییر شکل خاک، کرنش پلاستیک، گسیختگی و تفکیک بارگذاری و باربرداری را دارد.

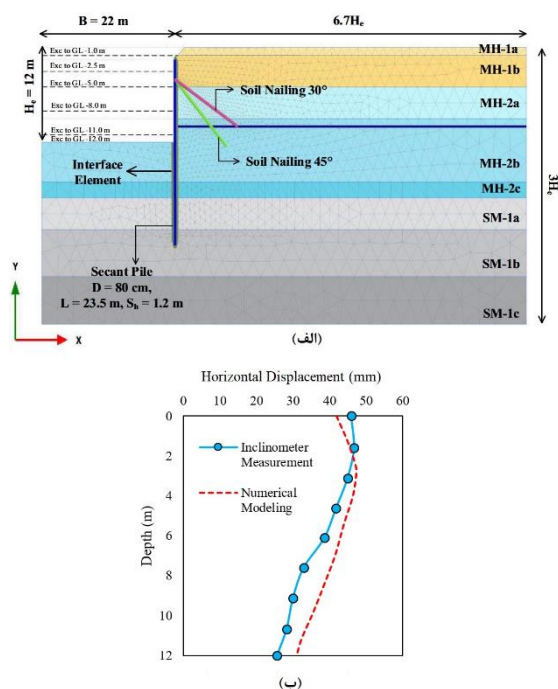
مشخصات پارامترهای در نظر گرفته شده برای خاک با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی خاک شهر تهران مطابق جدول ۱ است. در این مدل سازی، دیواره شاتکریت به ضخامت ۶ سانتی متر در نظر گرفته شده که با استفاده از المان Plate شبیه سازی شده است. همچنین پایداری سازی گود به روش میخ کوبی انجام شد و این المان ها نیز در مدل به صورت Plate مدل سازی شدند. میخ ها با زاویه ۷ درجه، گمانه دوغاب ریزی شده به قطر ۱۵ سانتی متر و طول ۸ متر و فاصله ۱۰۵ متر از هم هستند. مشخصات کلی شاتکریت و میخ ها در جدول ۲ ارائه گردیده است.

در حالت عمومی سه گود با ارتفاع ۴ متر (کم عمق)، ۱۰ متر (نیمه عمیق) و ۲۰ متر (عمیق) و عرض ۲۰ متر مدل سازی می شود. سپس برای بررسی پارامترهای دیگر شامل سطح آب زیرزمینی، وجود سازه حساس به تغییر مکان، وجود لایه های مختلف خاک و عرض گود، حالت بحرانی (گود عمیق) را در نظر گرفته و پارامترهای مورد مطالعه تغییر می کنند.

به منظور صحت سنجی مدل عددی از تحقیقات Lyman et

Farokhzad et al., 2020;) Bahramipour et al., 2025) پارامترهایی که در پایش و رفتارسنجی گودهای پایداری سازی شده به روش میخ کوبی باید بررسی شود عبارتند از: تنش ها و ارتعاش وارد بر المان مسلح کننده، جابجایی و تغییرات دما در المان مسلح کننده، تغییرات عرض ترک خوردگی، نشست در گود، خوردگی در المان مسلح کننده، رفتار زهکشی زمین، تغییرات تراز آب زیرزمینی و تورم کف گود (Byrne et al. 1998). روش های تجربی و نیمه تجربی اغلب برای تخمین نشست های سطحی زمین ناشی از حفاری های عمیق استفاده می شوند (Hsieh and Ou, 1998; Kung et al., 2007; Tang et al., 2024). با این حال، با توجه به اینکه کاربرد آنها در شرایط مختلف زمین و پیش بینی جابجایی خاک زیرسطحی محدود است، روش های عددی برای مدل سازی مسائل پیچیده اندرکنش خاک-سازه جایگزین مناسبی است (Ou and Hsieh, 2011; Zhu et al., 2025).

به طور کلی پایش گودهای شهری در سه بخش قبل از اجرای طرح، حین اجرا و پس از اجرا و حین بهره برداری انجام می گیرد. در این تحقیق، نظر به اهمیت بیشتر رفتارنگاری گودهای شهری در حین اجرا، به عنوان ابزاری برای پاسخگویی به نکات مبهم طرح اولیه و به کارگیری پارامترهای واقعی در اصلاح آن و همچنین کنترل رفتار سازه و گود، بهبود روش اجرا و جلوگیری از وقوع خطرات احتمالی و ریزش گود، پایش در حین اجرا در نظر گرفته شده است. انتخاب روش مناسب گودبرداری و پایداری سازی به عوامل مختلفی بستگی دارد و انتخاب مناسب ترین و بهینه ترین روش چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ اجرایی نیازمند شناخت دقیق پروژه و مطالعه دقیق روش های پایداری سازی و پایش است. در این پژوهش، روش میخ کوبی به عنوان روش پایداری سازی مورد بررسی قرار می گیرد. پیش بینی تغییر مکان ها یکی از مهم ترین مباحث در پایداری سازی گودها است. این پیش بینی توسط نرم افزارهای عددی مختلف قابل انجام است. در این نرم افزارها تخمین اولیه تغییر مکان ها در هر مرحله خاکبرداری با استفاده از مشخصات خاک، عمق گودبرداری و موارد دیگر محاسبه می شود. در این تحقیق، با استفاده از نرم افزار المان محدود PLAXIS، تأثیر پارامترهای عمق و عرض گود، وجود لایه خاک مسأله دار، آب زیرزمینی و سازه های حساس به تغییر مکان در مجاورت گود بر نحوه ارائه طرح پایش، بررسی می گردد.



شکل ۱. الف) تصویر شماتیک مقطع عرضی مطالعه موردی در تحقیقات (Lyman et al. (2022، ب) مقایسه جابجایی افقی دیوار در مدل عددی با اندازه‌گیری میدانی

۳- بیان و تحلیل نتایج

۳-۱- اثر تغییر پارامتر عمق گود

به منظور بررسی اثر تغییر پارامتر عمق، سه گود با ارتفاع ۴ متر (کم عمق)، ۱۰ متر (نیمه عمیق) و ۲۰ متر (عمیق) و عرض ۲۰ متر مدل‌سازی شد. طبق مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان، باید سطح خطرپذیری گود تعریف شود تا نیاز به پایدارسازی و برنامه‌ریزی طرح پایش بررسی شود. برای گودهایی با نسبت عمق گود به عمق بحرانی گود بیشتر از ۲، عمق گود از تراز صفر بیشتر از ۱۰ متر و عمق گود از زیر پی ساختمان موجود در محدوده ناپایداری گود بیشتر از ۶ متر، سطح خطر بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود که در اینجا نیز حالت سوم (بیشتر از ۱۰ متر) نیاز به ابزارگذاری و برنامه‌ریزی طرح پایش دارد. با توجه به این آیین‌نامه، به منظور استفاده از سیستم میخ‌کوبی به عنوان سازه نگهبان موقت، حداقل ضریب اطمینان مطلوب در حالت استاتیکی برای دیواره‌های گود ۱/۳ بوده و در حالت کاربرد دائمی سازه نگهبان این عدد برابر با ۱/۵ است. برای عمق ۴ متر، از ۲ عدد میخ در هر سمت گود استفاده

al. (2022) استفاده شد. تصویر شماتیک از گودبرداری یک برج در جاکارتای اندونزی در شکل ۱-الف نشان داده شده است. خصوصیات مصالح در مطالعات Lyman et al. (2022) تشریح شده است. همان‌طور که از شکل ۱-ب مشخص است مدل عددی به خوبی روند تغییر شکل دیوار را شبیه‌سازی کرده است.

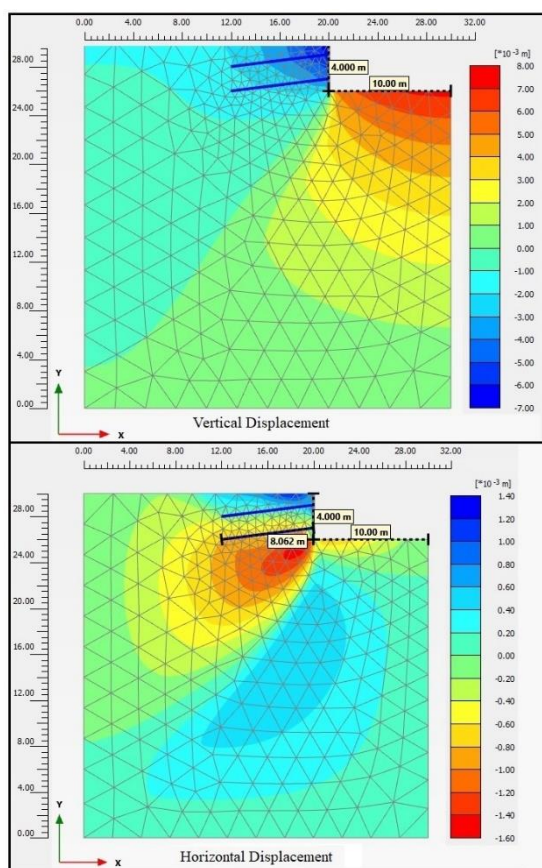
جدول ۱. مشخصات خاک استفاده شده در مدل عددی

پارامتر	مقدار
وزن مخصوص طبیعی خاک (kN/m^3)	17
زاویه اصطکاک داخلی (degree)	32
زاویه اتساع (degree)	5
چسبندگی (kN/m^2)	1
مدول الاستیسیته (kN/m^2)	20000
ضریب پواسون	0.2
فاکتور کاهش مقاومت سطح تماس (R_{inter})	1

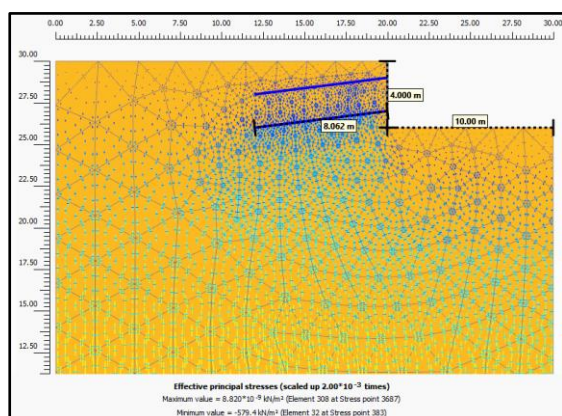
جدول ۲. مشخصات شاتکریت و میخ استفاده شده

در دیواره گود در مدل عددی

مشخصات	شاتکریت	میخ
ضخامت (m)	0.06	0.15
وزن (kN/m/m)	4.45	7.2
ضریب پواسون	0.17	0.3
EA (kN/m)	5×10^6	4.03×10^5
EI ($\text{kN.m}^2/\text{m}$)	1670	2220



شکل ۲. تغییر شکل افقی و قائم خاک پس از گودبرداری و اجرای میخ‌کوبی برای گود با عمق ۴ متر

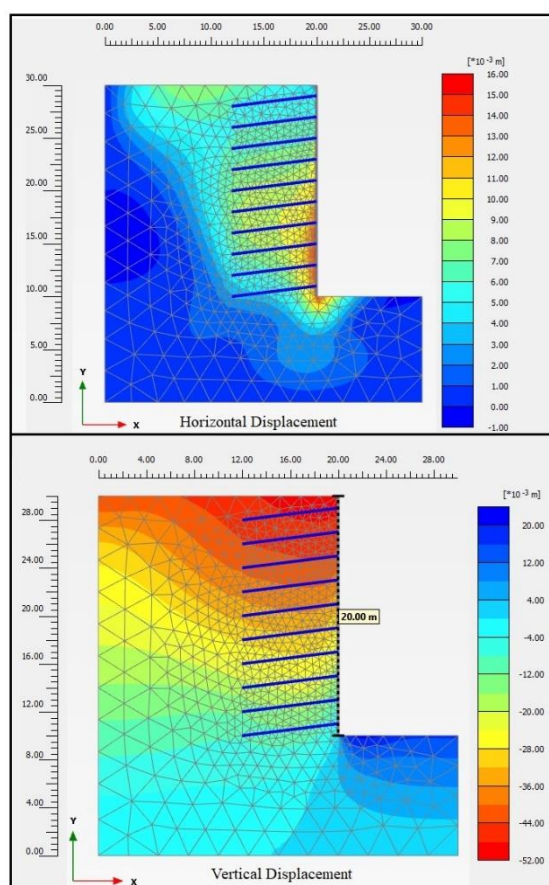


شکل ۳. تنش‌های مؤثر در خاک پس از گودبرداری و اجرای میخ‌کوبی برای گود با عمق ۴ متر

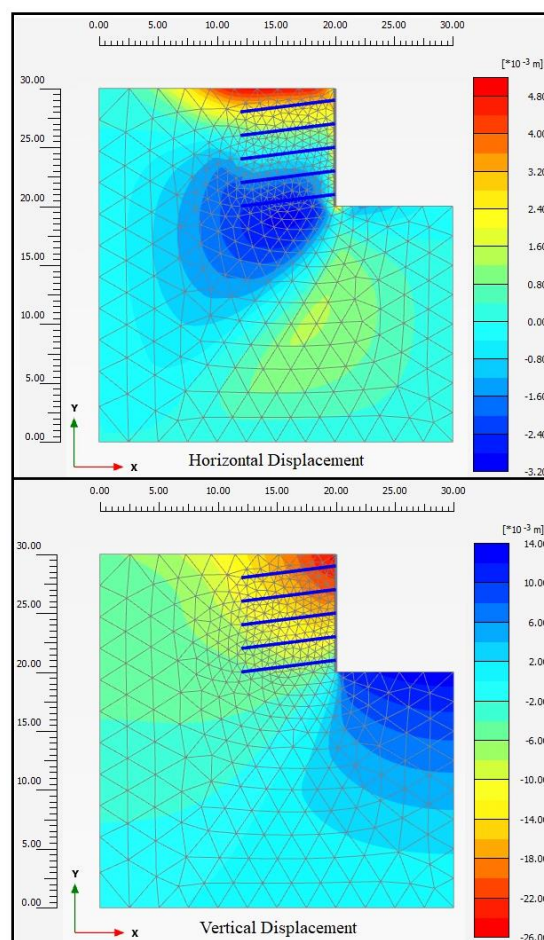
می‌شود. ارتفاع گود به ۲ بخش تقسیم شده که در مرحله توالی ساخت، هر کدام از میخ‌ها بعد از گودبرداری آن قسمت فعال می‌گردد. طبق آیین‌نامه بزرگراه‌های آمریکا، حداکثر مقدار میانگین تقریبی جابجایی و نشست دیواره تحکیم شده توسط مهارها در بازه ۰/۵٪ - ۰/۳٪ ارتفاع دیواره گودبرداری، تعیین گردیده است. با عنایت به این موضوع در دیواره گود با ارتفاع آزاد ۴ متر با توجه به مطالعات ژئوتکنیکی عمده جنس خاک شهر تهران (تیپ ۲: خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل شن و ماسه خیلی متراکم، رس بسیار سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش عمق به تدریج بهبود یابد)، حداکثر جابجایی و نشست این دیواره برابر محاسبات برابر ۸ میلی‌متر است که بیانگر ضریب اطمینان بالای طرح است. همچنین ضریب اطمینان به دست آمده از نرم‌افزار برابر ۲/۸۱ بود که بیشتر از ۱/۳ آیین‌نامه است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بیشترین مقدار جابجایی قائم گود در وسط ناحیه گودبرداری شده (ناحیه با رنگ قرمز: ۸ میلی‌متر) است که پدیده برآمدگی و تورم کف گود (که می‌تواند در شرایطی به جوشش و ناپایداری کف بیانجامد) را نشان می‌دهد. همچنین نشست زمین در نواحی مجاور گود (ناحیه با رنگ آبی: ۷ میلی‌متر) اتفاق می‌افتد که با عدم وجود تکیه‌گاه از یک سمت و دست‌خوردگی خاک بر اثر کوبش میخ‌ها، این رخداد طبیعی است. از نتایج جابجایی‌های افقی گود آنالیز شده در شکل ۲ مشخص است که بیشترین جابجایی به سمت راست در نقطه بالای گود (ناحیه با رنگ آبی: ۱/۴ میلی‌متر) اتفاق می‌افتد و امکان چرخش حول پاشنه دیواره هم در پایین‌ترین نقطه گود (ناحیه با رنگ قرمز: ۱/۶ میلی‌متر) به وقوع می‌پیوندد.

شکل ۳ تنش‌های اصلی مؤثر موجود در خاک و میخ‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اطراف میخ‌ها تنش‌های مؤثر به حداکثر مقدار خود می‌رسند که بیانگر وقوع جابجایی لازم برای به کارگیری میخ‌ها است. همچنین میخ‌های پایین بر اثر حداکثر فشار قائم خاک، بیشتر تحت تأثیر هستند.

نقطه نشانه‌ها، پارامترهای دوربین، پیچیدگی موانع سایت، شرایط جوی و بارش سنگین، شرایط نور و آفتاب، جابه‌جایی دوربین، جابه‌جایی نقطه نشانه‌ها، قدرت محاسبه ثبت‌کننده داده‌ها و به طور کلی الزامات پروژه، تعیین‌کننده فاصله و تعداد مناسب قرائت اطلاعات است. در شرایط نرمال پروژه در حال ساخت، قرائت تقریباً هفته‌ای یکبار اطلاعات مطلوب است. به دلیل سختی بتن شاتکریت، بهتر است انحراف‌سنج با فاصله ۶۰ الی ۱۰۰ سانتی‌متر از دیوار نصب شود. اگر دو جابه‌جایی قرائت شده متوالی بیشتر از ۱/۵ سانتی‌متر باشد بهتر است حفاری متوقف گردد (Langousis, 2007).



شکل ۵. تغییر شکل افقی و قائم خاک پس از گودبرداری و اجرای میخ‌کوبی برای گود با عمق ۲۰ متر



شکل ۴. تغییر شکل افقی و قائم خاک پس از گودبرداری و اجرای میخ‌کوبی برای گود با عمق ۱۰ متر

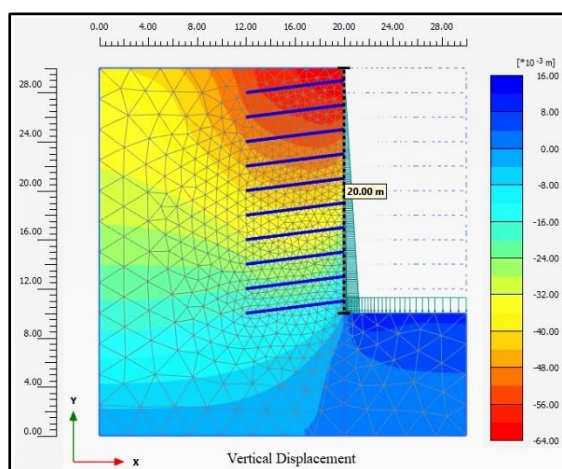
با افزایش عمق گود از ۴ متر به ۱۰ متر مشاهده شد که تغییر مکان افقی و قائم به ترتیب ۳ و ۳/۲۵ برابر می‌شود (شکل ۴) که هنوز در محدود تغییر شکل‌های مجاز گود ($H = 5 \text{ cm}$ یا $0.005 H$) است. در گود به عمق ۲۰ متر مشاهده شد که تغییر مکان افقی و قائم نسبت به عمق ۴ متر، به ترتیب ۱۰ و ۶/۵ برابر می‌شود (شکل ۵). در این حالت نیز جابه‌جایی‌ها در محدود تغییر شکل‌های مجاز گود باقی ماند. میزان جابه‌جایی افقی گود در بالای آن بیشتر از پایین است با این تفاوت که در فضای بین میخ‌ها، تنش بیشینه‌ای رخ می‌دهد که به دلیل عمق زیاد و فشار ناشی از دیواره گود است. به دلیل رخداد بیشترین میزان تغییر جابه‌جایی افقی، توصیه می‌شود تعدادی انحراف‌سنج در پشت دیواره شاتکریت شده نصب گردد. برای پروژه‌های در دست احداث، تواترهای قرائت به عوامل زیادی که روی حساسیت موضوع تأثیرگذار هستند، بستگی دارد. دقت اطلاعات مورد نیاز، اندازه و فاصله

دیوار مسلح و وسط گود با گیرداری حداقل ۶ متر پایین تر از کف گود است.

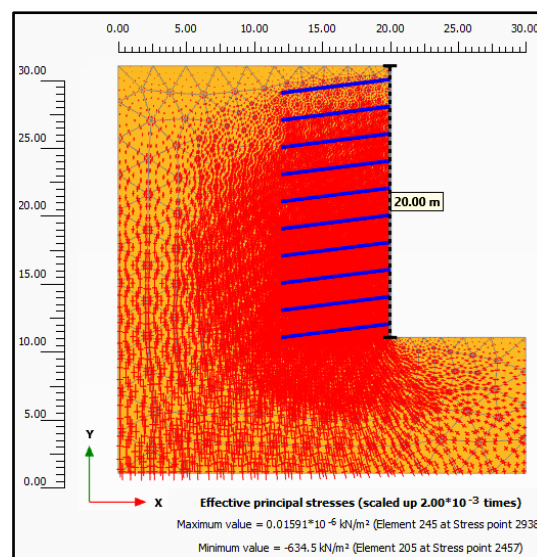
همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، تنش های بیشینه در میخ های نیمه پایینی اتفاق می افتد. لذا باید حداقل در ۵۰٪ ارتفاع پایین گود اجرا شده، نیروسنگ هایی به منظور اندازه گیری نیروی موجود در میخ ها نصب شود تا تغییر نیروی غیرمجاز سریعاً پایش و به اطلاع پیمانکار برسد. اثر تغییر ارتفاع گود در جابه جایی های قائم و افقی در دیواره گود در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳-۲- اثر تغییر پارامتر سطح آب زیرزمینی

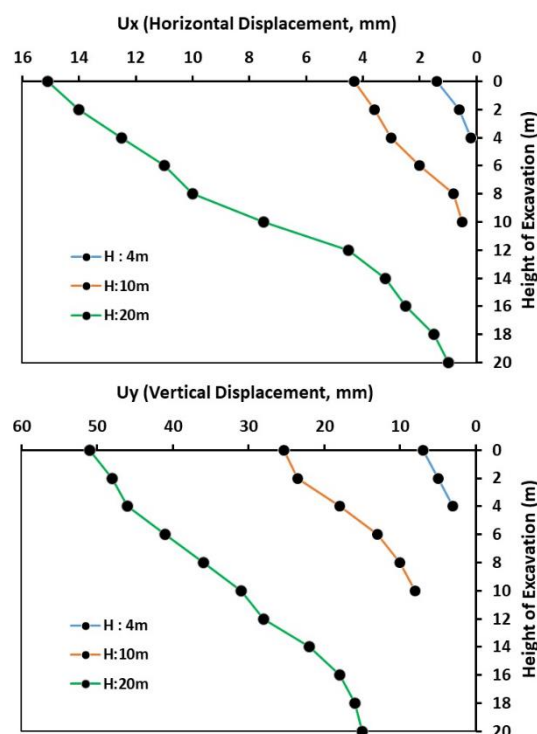
برای بررسی اثر سطح آب زیرزمینی در مدل گود ۲۰ متری، سطح آب دقیقاً در بالای گود تعریف شد. جابجایی قائم خاک در این حالت در شکل ۸ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود نشست قائم بر اثر بالا رفتن سطح آب زیرزمینی، نسبت به حالت خشک ۲۳٪ افزایش دارد. برای اندازه گیری فشار آب منفذی می توان از انواع پیزومتر در گمانه حفر شده در پشت دیوار (همراه با انحراف سنج) استفاده کرد. همان طور که از نتایج فشار آب منفذی در گود مدل سازی شده (شکل ۱۰) مشخص است در اطراف میخ ها و پشت دیواره بیشترین فشار آب منفذی مشاهده می شود که تأییدی بر این ادعا است که در پشت دیواره نیاز به پیزومتر برای اندازه گیری فشار آب است.



شکل ۸. تغییر شکل قائم خاک پس از اشباع شدن خاک برای گود با عمق ۲۰ متر

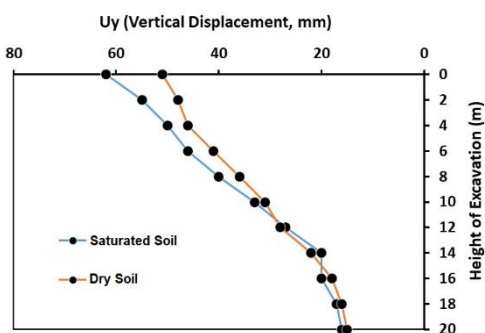
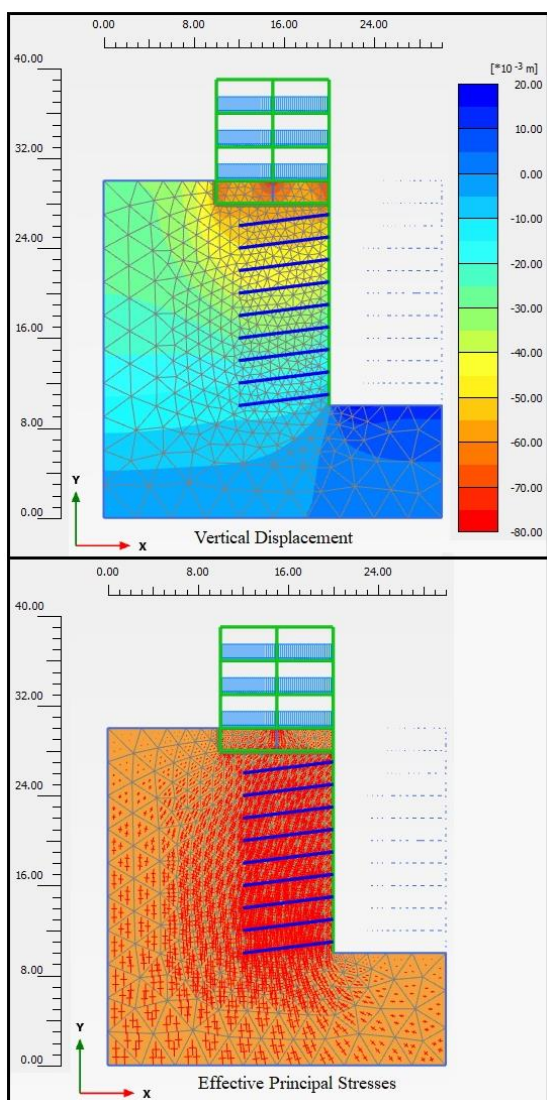


شکل ۶. تنش های مؤثر در خاک پس از گودبرداری و اجرای میخ کوبی برای عمق ۲۰ متر

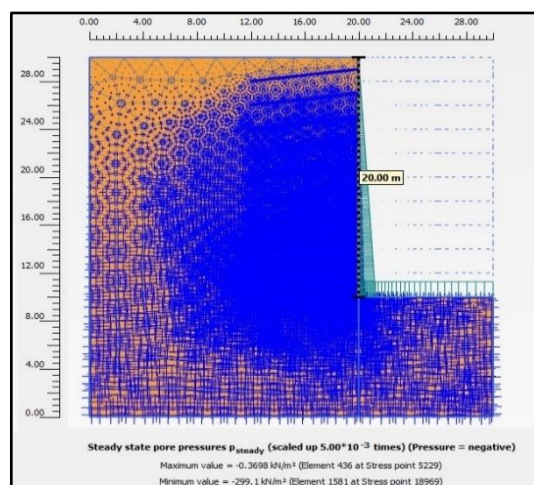


شکل ۷. جابه جایی قائم و افقی دیواره گود در ارتفاع های مختلف

از تغییر شکل های قائم به دست آمده از نتایج آنالیز عددی برداشت می شود که عمده نشست خاک در تاج گود اتفاق می افتد و همچنین تورم در کف گود نیز پدیده ای قابل ملاحظه است (شکل ۵). بهتر است در لوله جدار گمانه از ابزار نشست سنج (کشیدگی سنج) استفاده شود. محل قرارگیری این ابزار در پشت

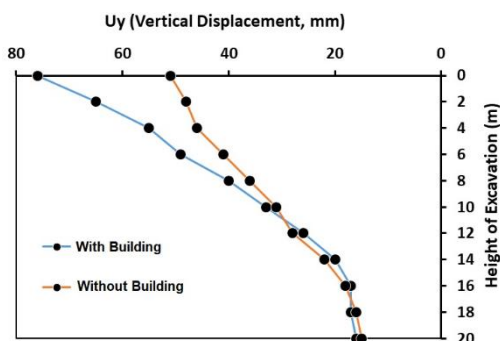


شکل ۹. مقایسه جابجایی قائم خاک در گود با عمق ۲۰ متر در حالت خشک و اشباع



شکل ۱۰. فشار آب منفذی پس از اشباع شدن خاک برای گود با عمق ۲۰ متر

شکل ۱۱. کانتور تغییر شکل قائم و تنش‌های اصلی مؤثر در خاک با وجود ساختمان در بالای گود با عمق ۲۰ متر



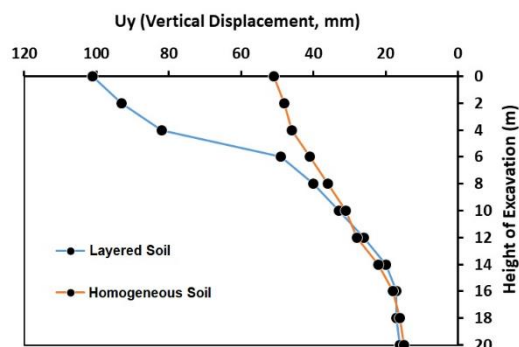
شکل ۱۲. مقایسه جابجایی قائم خاک در گود با عمق ۲۰ متر در حالت وجود سازه و بدون سازه

۳-۳- اثر وجود سازه حساس به تغییر مکان

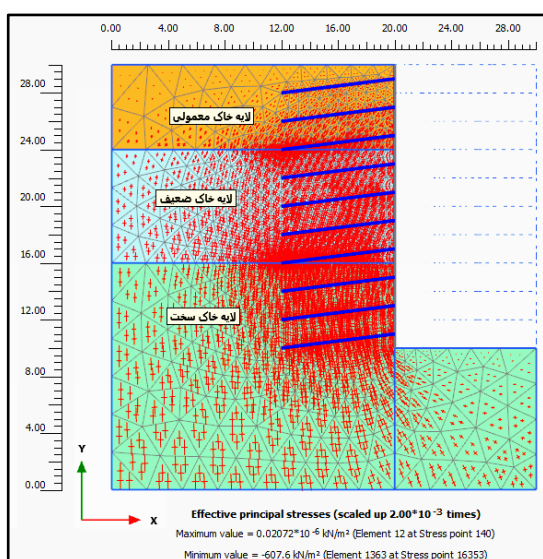
به منظور بررسی اثر وجود سازه در بالای گود بر جابجایی‌های به وجود آمده، یک ساختمان در مجاورت گود قرار داده شد که نتایج جابجایی‌های قائم در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقدار جابجایی قائم ۵۳ درصد نسبت به عدم وجود ساختمان بیشتر است (شکل ۱۲)؛ لذا باید از نشست‌سنج برای رصد حرکات قائم و انحراف‌سنج و کرنش‌سنج برای حرکات افقی استفاده کرد. نیروی به وجود آمده در میخ‌ها طبق شکل ۱۱ به مقدار ۳۴ درصد افزایش داشته که لزوم قرارگیری نیروسنج در ابتدای میخ‌ها را نشان می‌دهد. همچنین استفاده از شیب‌سنج بر دیواره ساختمان برای رؤیت میزان انحراف ناشی از تغییر شکل‌های سازه توصیه می‌گردد.

۳-۴- اثر وجود لایه‌های مختلف خاک

به منظور بررسی اثر وجود لایه‌های مختلف و مسأله‌دار خاک بر جابه‌جایی‌های به وجود آمده، مدلی از نوع ۳ خاک ضعیف و معمولی و سخت ساخته شد که نتایج جابه‌جایی‌های قائم در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



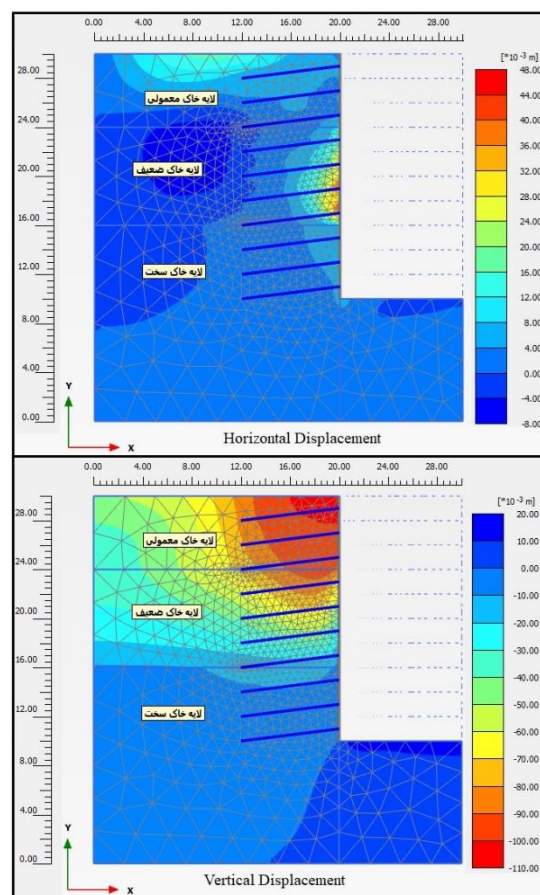
شکل ۱۴. مقایسه جابجایی قائم خاک در گود با عمق ۲۰ متر در حالت وجود لایه‌های مختلف



شکل ۱۵. تنش‌های اصلی موثر پس از اعمال لایه‌های خاک مسئله‌دار برای گود با عمق ۲۰ متر

۳-۵- اثر تغییر عرض گود

به منظور بررسی اثر عرض گود بر پارامترهای طراحی، دو مدل گود به عرض ۱۰ متر و ۶۰ متر طراحی و آنالیز شد. جابه‌جایی‌های افقی و قائم تغییر نسبتاً ناچیزی نسبت به گود با عرض ۲۰ متر (مدل پایه) داشتند. در شکل ۱۶ تغییر شکل افقی گود برای عرض ۱۰ متر و ۶۰ متر نشان داده شده است.



شکل ۱۳. تغییر شکل‌های افقی و قائم خاک پس از اعمال لایه‌های مختلف خاک برای گود با عمق ۲۰ متر

همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود مقدار جابه‌جایی قائم ۱۱۰ درصد نسبت به عدم وجود لایه‌های خاک مسأله‌دار بیشتر است. لذا باید از نشست‌سنج برای رصد حرکات قائم در پشت دیوار استفاده کرد. نتایج جابه‌جایی‌های افقی در شکل ۱۳ بیانگر این است که در مرز لایه‌های خاک مسأله‌دار، جابه‌جایی‌های ناگهانی و زیادی مشاهده می‌شود. لذا باید حتماً از انحراف‌سنج در پشت دیوار و کرنش‌سنج روی میخ‌ها برای رصد حرکات افقی به خصوص در نیمه پایینی استفاده کرد. در مرز لایه‌های خاک مسأله‌دار حداکثر نیروی به وجود آمده

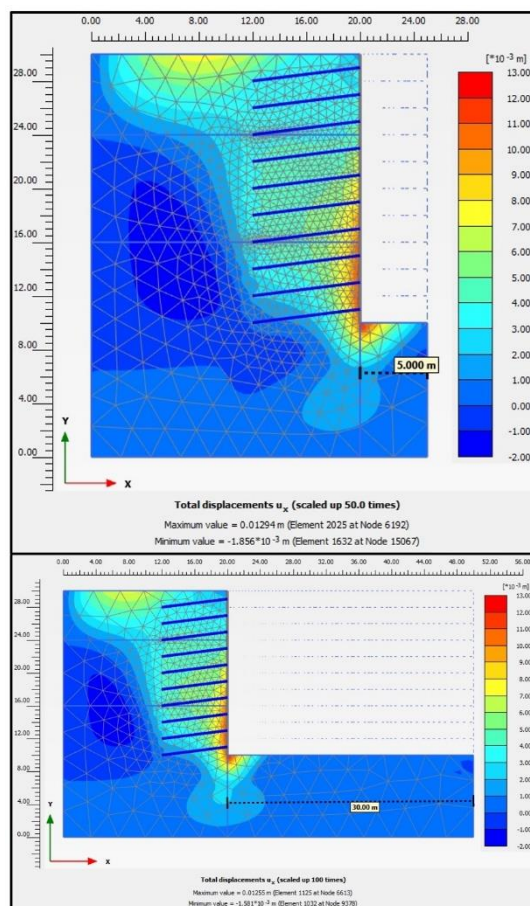
شکل ۱۷ مقایسه جابجایی‌های قائم خاک برای گود با عرض‌های مختلف ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، در عرض‌های مختلف لزوماً اتفاق خاصی رخ نمی‌دهد که نیاز به ابزارگذاری بیشتر و تغییر برنامه پایش باشد. قابل ذکر است که تمامی ابزارهای مدل پایه از قبیل انحراف‌سنج و غیره، همچنان باید در محل مورد نظر نصب گردند.

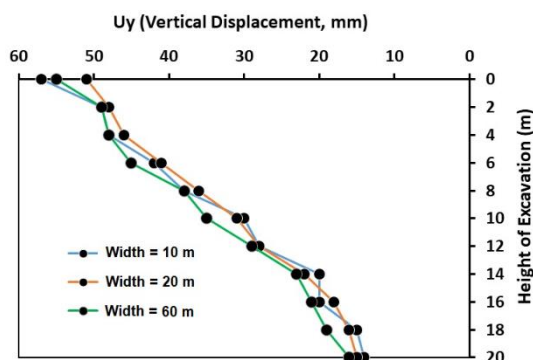
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش المان محدود در نرم‌افزار PLAXIS، اثر پارامترهای مختلف هندسی و ژئوتکنیکی بر رفتار گودهای پایدارسازی‌شده به روش میخ‌کوبی و نحوه تدوین طرح پایش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش عمق گود نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش جابه‌جایی‌های قائم و افقی دارد، به گونه‌ای که برای گودهای عمیق، استقرار یک سیستم پایش منظم و هدفمند امری ضروری است. بر اساس الگوی تغییرمکان‌ها، استفاده از انحراف‌سنج برای کنترل جابه‌جایی‌های افقی دیواره و نشست‌سنج برای پایش نشست تاج و تورم کف گود، به‌ویژه در پشت دیواره و نواحی میانی گود، توصیه می‌شود. همچنین تمرکز تنش‌ها در نیمه پایینی گود و میخ‌ها بیانگر لزوم استفاده از نیروسنج در میخ‌های این ناحیه به منظور کنترل نیروهای داخلی و افزایش ایمنی سازه نگهبان است.

بررسی اثر شرایط خاص پروژه نشان داد که وجود سطح آب زیرزمینی، سازه‌های حساس به تغییرمکان و لایه‌های خاک مسئله‌دار، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باعث افزایش تغییرشکل‌ها و نیروهای داخلی می‌شود و در این شرایط، ابزارگذاری دقیق‌تر شامل پیزومتر، کرنش‌سنج و نیروسنج در نقاط بحرانی ضروری است. در مقابل، تغییر عرض گود تأثیر معناداری بر نتایج نداشته و نیازمند اصلاح اساسی در برنامه پایش نیست. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طرح پایش گودهای میخ‌کوبی‌شده باید مبتنی بر عمق گود و شرایط ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی محل باشد و رویکرد یکسان برای تمامی پروژه‌ها نمی‌تواند ایمنی و کارایی لازم را تأمین کند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان راهنمایی کاربردی برای مهندسان ژئوتکنیک در طراحی بهینه و هدفمند سیستم‌های پایش گودهای شهری مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۶. تغییر شکل افقی گود به عرض‌های ۱۰ متر و ۶۰ متر برای گود با عمق ۲۰ متر



شکل ۱۷. تغییر شکل افقی گود به عرض ۶۰ متر برای گود با عمق ۲۰ متر

۵- مراجع

- Bahramipour, O., Moezzi, R., Jalali, F.M., Khaksar, R.Y., & Gheibi, M. (2025). Parametric Evaluation of Soil Nail Configurations for Sustainable Excavation Stability Using Finite Element Analysis. *Inventions*, 10(4), 45.
- Byrne, R.J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., & Ueblacker, G. (1998). Soil manual for design and construction monitoring of soil nail walls. *Federal Highway Administration*, No. FHWA-SA-96-069R.
- Farokhzad, F., Shabani, M.J., & Hasanpour, A. (2020). Investigating Stabilized Excavations Using Soil Nailing Method in Urban Context. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(2), 126-138.
- Hsieh, P.G., & Ou, C.Y. (1998). Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), 1004-1017.
- Kung, G.T., Juang, C.H., Hsiao, E.C., & Hashash, Y.M. (2007). Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 731-747.
- Langousis, M. (2007). Automated monitoring and inverse analysis of a deep excavation in Seattle. MS thesis, Northwestern University, Evanston, IL.
- Liu, K., Meng, Q., Kong, Q., & Zhang, X. (2022). Review on the Developments of Structure, Construction Automation, and Monitoring of Intelligent Construction. *Buildings*, 12(11), 1890.
- Lyman, R.A., Lim, A., & Rahardjo, P.P. (2022). Estimating system stiffness of soil nailing wall for deep excavation in clay. *International Journal of Civil Engineering*, 20(9), 1009-1025.
- Ou, C.Y., & Hsieh, P.G. (2011). A simplified method for predicting ground settlement profiles induced by excavation in soft clay. *Computers and Geotechnics*, 38(8), 987-997.
- Tan, Y., Jiang, W.Z., Rui, H.S., Lu, Y., & Wang, D.L. (2020). Forensic geotechnical analyses on the 2009 building-overturning accident in Shanghai, China: Beyond common recognitions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(7), 05020005.
- Tang, C., He, S., & Zhou, W. (2024). An efficient physics-guided Bayesian framework for predicting ground settlement profile during excavations in clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(4), 1411-1424.
- Tian, H., Wang, Y., & Huang, Y. (2025). Uncertainty-aware digital twins for deep excavations with lateral support. *Automation in Construction*, 181, 106658.
- Zheng, C., Franza, A., & Jimenez, R. (2022). Analysis of floating and end-bearing pile foundations affected by deep-excavations. *Computers and Geotechnics*, 153, 105075.
- Zhu, Y., Wang, W., Xu, Z., Chen, J., & Zhang, J. (2025). Hydro-Mechanical Numerical Analysis of a Double-Wall Deep Excavation in a Multi-Aquifer Strata Considering Soil-Structure Interaction. *Buildings*, 15(6), 989.