

تحلیل اندرکنش خاک - سازه برای ساختمان بلند مجاور گود عمیق

نوید یگانه^۱، علی اخترپور^{۲*}، جعفر بلوری بزاز^۳، محمد صالح برادران^۴

پدیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳

چکیده

روندی که در آن پاسخ خاک تحت تأثیر حرکت سازه و پاسخ سازه تحت تأثیر حرکت خاک قرار می گیرد، به اندرکنش خاک - سازه مشهور است. گودبرداری در مجاورت ساختمان می تواند اثرات اندرکنشی خاک - سازه را تشدید نماید. در این پژوهش مدل های اندرکنشی خاک - سازه و ساختمان - گودبرداری به همراه مدل سازه با تکیه گاه ثابت بر اساس روش تفاضلات محدود در نرم افزار FLAC تحلیل شده است. مدل اصلاح شده موهر- کولمب برای خاک استفاده شده و به کمک قابلیت برنامه نویسی این نرم افزار، وابستگی سختی به تنش و رفتار باربرداری مصالح اعمال گردیده است. همچنین صحت سنجی مدل بر پایه ابزار دقیق سازه و گودبرداری صورت گرفته است. نتایج تحلیل حاکی از آن است که به علت صلیبیت بالای سیستم سازه نگهدارنده، گودبرداری تأثیر چندانی بر مقادیر نیروهای داخلی قاب ساختمانی مجاور آن ندارد و نوع مدل سازی سازه مجاور گودبرداری به صورت سرپار یا قاب ساختمانی تنها بر تغییر شکل قائم پی ساختمان موجود طی مراحل گودبرداری تأثیرگذار می باشد.

واژگان کلیدی: گودبرداری، قاب ساختمانی، اندرکنش خاک - سازه، ابزار دقیق، صحت سنجی، *FLAC2D*

- ۱ دکتری مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه تگزاس سیدنی، استرالیا
 - ۲ عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد. akhtarpour@um.ac.ir
 - ۳ عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد
 - ۴ دستیار پژوهشی گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد
- * مسئول مکاتبات

مشهد می‌باشد. مهمترین دلایل انتخاب این پروژه واقع در میدان جانباز روبروی مجتمع تجاری پروما به عنوان مطالعه موردی عبارتند از الف) نصب انحراف‌سنج بر روی ستون برج مجاور گود و بارسنج در محل مهاری‌ها، ب) وجود ساختمان بلند (برج ۱۷ طبقه) در مجاورت پروژه گودبرداری با طرح دائمی، پ) سازه نگهبان به صورت شمع و مهاری با نیروی پس کشیدگی.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. روش‌های تحلیل اندرکنش خاک - سازه

روش‌های تحلیل اندرکنش خاک - سازه را می‌توان به دو گروه اصلی، روش مستقیم و روش چندگامه^۳ یا زیرسازه طبقه‌بندی نمود.

- روش مستقیم: در روش مستقیم، کل سیستم سازه - پی -

خاک به صورت شکل ۱ مدل می‌شود و در یک گام منفرد

تحلیل می‌گردد. مزیت عمده این روش امکان فرض رفتار

غیرخطی برای مصالح خاک و سازه و همچنین امکان مدل-

سازی هندسه‌های پیچیده می‌باشد. از معایب روش مستقیم

می‌توان به حجم زیاد ورودی و خروجی‌ها، پیچیدگی و

زمان‌بر بودن آن اشاره نمود (Mercado et al., 2021). در

پژوهش حاضر نیز از روش مستقیم با استفاده از نرم‌افزار

FLAC استفاده شده است.

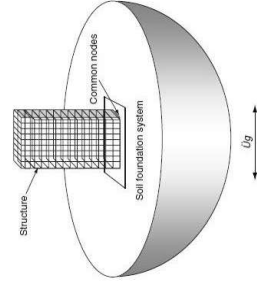
- روش زیرسازه: در این روش مسئله خطی اندرکنش خاک -

سازه به یک سری زیرسازه ساده‌تر تفکیک می‌گردد و

سپس نتایج با استفاده از اصل جمع آثار قرا با هم ترکیب

می‌شوند (Mercado et al., 2021; Tareghian et al., 2024).

۲۰۲۴.



شکل ۱. سیستم خاک - سازه در روش مستقیم

۱. مقدمه

تئوری ارائه شده برای بررسی ارتعاشات پی در سال ۱۹۳۶ نقطه‌ی

آغازین مطالعات اندرکنش خاک - سازه می‌باشد. (Reissner, E.,

Baradaran et al, 2024; 1936). وولف به بیان مبانی و اثرات

اندرکنش خاک - سازه، چگونگی مدل‌سازی خاک - سازه - پی،

روابط معادلات حرکت و همچنین روش‌های تحلیل و پاسخ آن‌ها

پرداخته است (Ayar et al, 2022; Yazdi et al, 2023). اگرچه

اندرکنش بین ساختمان، پی و محیط خاک رفتار واقعی سازه را

بطور قابل توجهی در مقایسه با رفتار سازه با تکیه‌گاه صلب^۱ تغییر

می‌دهد، اما اعمال اثر گود بر مجموعه سازه - پی - خاک از آن

دسته موضوعاتی می‌باشد که کارهای تحقیقاتی بسیار کم و

محدودی را شامل شده است. در این زمینه می‌توان به بررسی

پریود ساختمان فرضی با قاب خمشی فولادی مستقر بر خاک دانه-

ای مجاور گودبرداری با سیستم دیوار حائل بتنی توسط نرم-

افزار ABAQUS (Akhtarpour and Mortezaee, 2019) و

همچنین بررسی اثر زلزله بر گودبرداری به عمق ۹/۵ متر و سیستم

دیواره دیافراگمی به همراه یک ردیف مهاری و ساختمان بتنی

فرضی ۵ طبقه مجاور آن در نرم‌افزار PLAXIS اشاره نمود

(Ismail Ibrahim and Ibrahim, T. E., 2013). لازم به ذکر است

که برخلاف گودبرداری، اندرکنش سایر حفاری‌ها همانند احداث

تونل با سازه مجاور بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است (Mrouteh

and Shahrour, 2003).

بطور کلی تاکنون روش‌های مختلفی جهت اعمال اثر ساختمان در

مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی به شرح سربار، روش تیر ارتجاعی

معادل (Baradaran et al., 2023; Balighi et al, 2024)، روش تیر

متورق (Finno et al., 2005) و روش مدل‌سازی کامل پیشنهاد

شده است. کامل‌ترین و دقیق‌ترین روش مدل‌سازی به صورت قاب

ساختمانی می‌باشد، زیرا نحوه مدل‌سازی سازه‌های مجاور محل

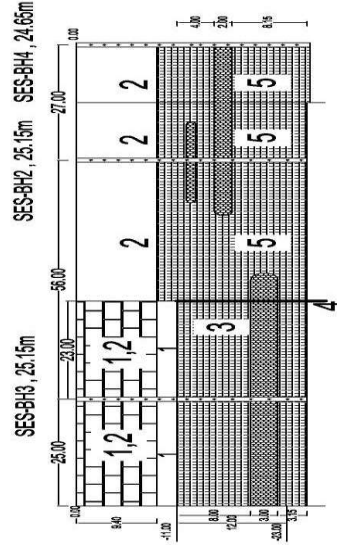
گودبرداری بستگی به وزن، هندسه و سختی سازه دارد که در

روش آخر بطور کامل منظور می‌گردد. از اینرو در پژوهش حاضر

به بررسی دو روش مدل‌سازی ساختمان مجاور گودبرداری به

صورت قاب و روش متداول سربار پرداخته شده است. پروژه

مورد مطالعه جهت مدل‌سازی، مرکز بین‌المللی مالی اقتصادی



شکل ۲. پروفیل لایه‌های زیرسطحی (قسمت فوقانی)

۲-۲. خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی

براساس پردازش داده‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها، نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی اقدام به رسم پروفیل خاک محل شده و واحدهای ریزدانه و درشت‌دانه به اعماق مختلف پروفیل زیرسطحی با توجه به تشابه ویژگی‌ها، اختصاص داده شده است. در ادامه منظور از قسمت فوقانی، اطلاعات بدست آمده از مطالعات ژئوتکنیک از تراز خیابان اطراف گودبرداری تا تراز کف گود می‌باشد و عبارت قسمت تختانی به مطالعات از تراز کف گود به بعد اطلاق می‌گردد.

طبقه‌بندی خاک به روش سیستم یونیفاید (متحد) انجام و دو واحد خاکی برای این پروژه تعریف شده است. واحد درشت‌دانه، شامل SC و SM - SC و واحد ریزدانه، شامل CL و ML - CL می‌باشد. براساس یک محاسبه آماری، حدود ۷۹ درصد قسمت فوقانی از واحد درشت‌دانه و حدود ۲۱ درصد از واحد ریزدانه تشکیل شده است، اما واحد ریزدانه قسمت تختانی نسبت به قسمت فوقانی افزایش چشمگیری دارد، بطوریکه حدود ۵۳ درصد قسمت تختانی شامل واحد درشت‌دانه و حدود ۴۷ درصد شامل واحد ریزدانه است

نتایج نهایی ترسیم پروفیل لایه‌های زیرسطحی در شکل ۲ و شکل ۳ ارائه شده است، ضمن آنکه توضیحات شماره‌گذاری انجام شده در شکل ۲ نیز به صورت بیان شده می‌باشند. (۱) برج مجاور

عملیات گودبرداری و فونداسیون آن، (۲) خاکبرداری انجام شده قبل از اجرای برج و گودبرداری، (۳) ناحیه اجرای مهار، (۴) شمع، (۵) محل گودبرداری.

پس از تجزیه و تحلیل کلیه نتایج آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی پروژه یادشده، پارامترهای ژئوتکنیکی برای ده لایه خاک موجود در محل جهت مدل‌سازی به شرح جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک محل

Layer	Thickness (m)	Soil Type	Specific Gravity (kN/m ³)	Internal Friction (Degree)	Cohesion (kg/cm ²)
1	9.6	Coarse	20	34	0.20
2	3	Fine	19.7	28	0.25
3	8	Coarse	20	36	0.20
4	6	Fine	19.5	20	0.25
5	4.5	Coarse	18	35	0.20
6	11	Fine	19.5	24	0.25
7	1.5	Coarse	20	39	0.20
8	4	Fine	19.5	28	0.25
9	2.5	Coarse	18.5	26	0.20
10	1.5	Fine	19.5	28	0.25

$$E = E_{oed} \times \left(\frac{(1+v) \times (1-2\nu)}{(1-\nu)} \right) \quad (۳)$$

که در این رابطه $\nu = 0$ نسبت پواسون می باشد. با لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۱) و رسم آن در محورهای مختصات دو بعدی براساس رابطه خطی $y=b+ax$ ؛ شیب خط نشان دهنده پارامتر n و عرض از مبدا همان لگاریتم پارامتر K می باشد. نتایج نهایی برای پارامترهای مورد بحث به شرح جدول ۲ ارائه می گردد.

جدول ۲. مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای K و n

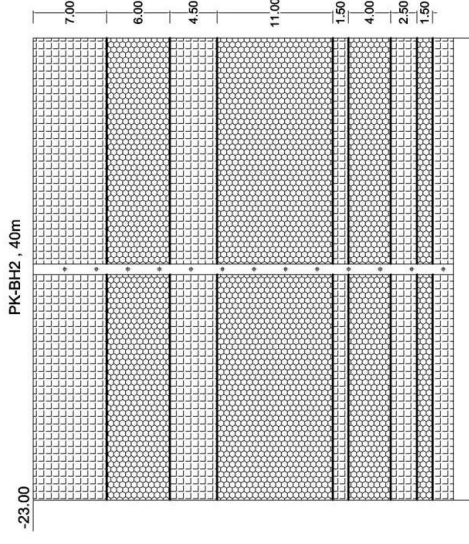
Layer	K	n
Coarse	78	0.91
Fine	62	0.74

نکته قابل توجه آن است که رابطه (۱) بر مبنای ضریب ارتجاعی اولیه می باشد، اما محاسبات فوق برحسب ضریب ارتجاعی ادمتری است. ارتباط دهنده بین E_i و E_{oed} مطابق رابطه (۴) و رابطه (۵)، پارامتری به نام ضریب تغییر شکل در ۵۰ درصد مقاومت (E_{50}) می باشد. مقدار K براساس ضریب ارتجاعی اولیه برای خاک دانه ای برابر ۱۵۰ پیشنهاد شده است (Yeganeh and Fatahi , 2018; Pourmoori et al, 2024). با توجه به رابطه های زیر، این پارامتر براساس ضریب ارتجاعی ادمتری برابر ۷۵ بدست می آید، که اختلاف ناچیزی با مقدار K برابر ۷۸ برگرفته از جدول ۲ دارد. ضمن آنکه نسبت پواسون برای قسمت فوقانی و تحتانی لایه های زیرسطحی برابر ۰/۲۵ انتخاب شده است (Baradaran and Ameri, 2023).

$$E_{oed} \approx E_{50} \quad (۴)$$

$$E_{50} \approx 0.5 \times E_i \quad (۵)$$

ضریب ارتجاعی باربرداری و بارگذاری مجدد خاک مطابق رابطه (۶) محاسبه می گردد. ضریب سختی برای باربرداری و بارگذاری مجدد نسبت به بارگذاری اولیه بیشتر است



شکل ۳. پروفیل لایه های زیرسطحی (قسمت تحتانی)

۳-۲. ضریب ارتجاعی و نسبت پواسون

محققین در بخشی از توسعه مدل هاپرپولیک، تغییرات ضریب ارتجاعی اولیه (E_i) با تنش همه جانبه را به صورت رابطه (۱) بیان (Pargar et al, 2021; Pagar and Liu, 2024) و مقادیری را برای پارامترهای K و n در خاک های مختلف پیشنهاد نموده اند. البته با توجه به انجام آزمایش تحکیم در پروژه مورد مطالعه، مقادیر این پارامترها به شیوه زیر محاسبه می گردند.

$$E_i = K \times P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (۱)$$

که در این رابطه: $K =$ عدد ضریب، $n =$ توان ضریب، $P_a =$ فشار اتمسفر، برابر ۱۰۰ کیلو پاسکال، $\sigma_3 =$ تنش همه جانبه، برابر حاصلضرب ضریب فشار جانی حالت سکون خاک در فشارهای قائم آزمایش تحکیم می باشد. براساس مقدار ضریب تغییر حجم (m_v) و استفاده از رابطه (۲)، ضریب ارتجاعی ادمتری (E_{oed}) بدست می آید. به کمک تئوری ارتجاعی می توان ضریب ادمتری را به ضریب ارتجاعی به شرح رابطه (۳) مرتبط نمود (Kempfert and Baradaran et al, 2024; Gebreselassie, 2006; Baradaran et al, 2024).

$$E_{oed} = \left(\frac{1}{m_v} \right) \quad (۲)$$

۳. مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC2D

نرم‌افزار FLAC یک برنامه تفاضل محدود صریح می‌باشد که در محاسبات مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود قابلیت برنامه‌نویسی FISH در این نرم‌افزار، امکانات گسترده‌ای را جهت مدل‌سازی مسائل اندرکنش خاک - سازه در قیاس با سایر نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی فراهم می‌سازد.

۳-۱. مشخصات اجرایی و تعیین پارامترهای مدل‌سازی عددی مهاری

در صورت عدم اهمیت اثرات خمش، می‌توان از عنصر کابل^۱ برای مدل‌سازی مهاری^۷ در نرم‌افزار FLAC استفاده نمود. عنصر کابل یک عضو تک محوری یک بعدی است که اجازه مدل‌سازی مقاومت برشی را در راستای طول خود به صورت مقاومت برشی طول گیرداری (طول تزیق)^۸ بین دوغاب و کابل یا دوغاب و محیط اطراف فراهم می‌نماید (Itasca, 2011).

جهت حفاری گمانه‌ها، به دلیل ریزشی بودن محیط خاکی اطراف از سیستم حفاری ODEX-115 استفاده شده است. قطر سر مته این مدل برابر ۱۱۵ میلی‌متر می‌باشد که با توجه به عملکرد جدار تراش آن، قطر نهایی برابر ۱۵۲ میلی‌متر حاصل می‌گردد (Talalay et al., 2021). استرنند عبارت است از کابلی که از ۷ رشته سیم بهم تابیده تشکیل شده است. در این پروژه برای مهاری ردیف اول با نیروی پس کشیدگی ۷۵ تن از ۵ کابل و برای سایر مهاری‌ها با نیروی پس کشیدگی ۶۰ تن از ۴ کابل با وادادگی کم و قطر ۰/۶ اینچ استفاده شده است. فواصل افقی مهاری‌ها مشابه شمع‌ها برابر ۲ متر می‌باشد. فواصل قائم، زاویه و طول مهاری‌ها نیز در شکل ۴ ارائه شده است.

(Brinkgreve, 2012) و بطور کلی یک مقدار مشابه برای حالت باربرداری و حالت بارگذاری مجدد در نظر گرفته می‌شود.

$$E_{irr} = K_{irr} \times P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

که در این رابطه $K_{irr} =$ عدد ضریب باربرداری - بارگذاری مجدد. در غیاب محاسبات دقیق معمولاً بین ۱/۲ الی ۳ برابر K انتخاب می‌گردد. بر مبنای نتایج آزمایشات تحکیم در محدوده بیش تحکیم یافتگی (شیب خط باربرداری و بارگذاری مجدد) مقدار K_{irr} تعیین شده است که به شرح جدول ۳ می‌باشد. مقدار نسبت پواسون باربرداری و بارگذاری مجدد بین ۰/۸ تا ۰/۲ متغیر است، بنابراین مقدار ۰/۱۵ انتخاب شده است.

جدول ۳. مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای K_{irr} و n

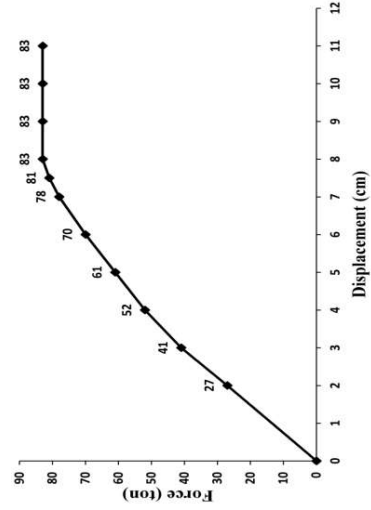
Layer	K_{irr}	n
Coarse	282	0.91
Fine	224	0.74

۳-۲. مدل رفتاری خاک

برای انتخاب یک مدل مناسب به منظور شبیه‌سازی رفتار خاک نزدیک به گود باید دو نکته زیر مورد توجه قرار گیرند (Tabaroei et al., 2022). (الف) گودبرداری سبب کاهش تنش در خاک اطراف گود و کف آن می‌شود، بنابراین الگوی رفتاری باید قادر به شبیه‌سازی مناسب رفتار باربرداری باشد. (ب) در اثر افزایش تنش، سختی نیز افزایش می‌یابد. در یک الگوی رفتاری مناسب، وابستگی تنش و سختی به یکدیگر لحاظ می‌گردد. جهت در نظر گرفتن نکات فوق در مدل‌سازی، اقدام به برنامه‌نویسی در نرم‌افزار FLAC می‌گردد. بنابراین در این پژوهش از مدل رفتاری موهر - کولمب اصلاح شده برای خاک استفاده شده است.

(2015)

در شکل ۶ نمودار نیرو - جابه‌جایی مهارهای ردیف اول حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که ظرفیت باربری نهایی مهارهای بدست آمده از مدال عددی (برابر ۸۳ تن) اختلاف قابل قبولی با رابطه پیشنهادی محققین براساس مقاومت برشی مرز تماس ناحیه تخریب و خاک (برابر ۸۱ تن) دارد. همچنین اختلاف تغییر مکان حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج کشش مهار در اجرا نیز ناچیز و در حدود ۵ میلیمتر می‌باشد. بنابراین از این شیوه با دقت بالا در مدال سازی عددی گودبرداری با سیستم مهارهای در محیط خاکی می‌توان بهره جست (Yeganeh et al., 2015).

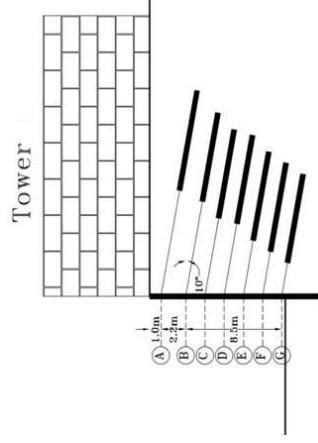


شکل ۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی برگرفته از نتایج آزمون کشش (Yeganeh et al., 2015)

۲-۳. مشخصات اجرایی و تعیین پارامترهای مدال‌سازی عددی شمع

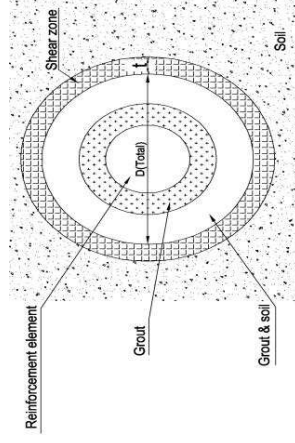
شمع بتنی سازه نگهبان این پروژه دارای قطر ۸۰ سانتیمتر و طول ۱۸ متر می‌باشد که با ضریب ارتجاعی $2/9 \times 10^{10}$ پاسکال و جرم مخصوص ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به صورت درجا اجرا شده است. سایر پارامترهای مورد نیاز جهت مدال‌سازی عددی شمع در ادامه تشریح شده‌اند.

الف) ممان اینرسی: ممان اینرسی مقطع ترک خورده، ۴۰ تا ۵۰ درصد ممان اینرسی مقطع ترک نخورده شمع می‌باشد



شکل ۴. فواصل قائم، زاویه و طول مهارها

بطور کلی مقطع مهارهای در خاک مطابق شکل ۵ به پنج ناحیه عنصر مسلح‌کننده، دوطاب، مخلوط دوطاب و خاک اطراف، ناحیه برشی و محیط خاکی تقسیم‌بندی می‌شود. اصولاً تعیین قطر ناحیه تخریب چالش اساسی جهت برآورد نیروی مهارهای است. قطر ناحیه تخریب شده طبق روش پیشنهادی (Yeganeh et al., 2015) براساس فشار تخریب، حجم دوطاب، پوکی و ضخامت ناحیه برشی تعیین می‌گردد که در این پروژه حدود ۴۰ درصد نسبت به قطر حاصل از حفاری افزایش نشان می‌دهد. این در حالی است که در محیط‌های سنگی قطر ناحیه تخریب برابر قطر حفاری است. مبنای راهنمای نرم‌افزار $FLAC$ مدال‌سازی مهارهای در محیط سنگی می‌باشد و یکسری توصیه‌های بسیار کلی براساس تحقیقات پیشین در زمینه پیچ سنگ‌ها^۹ در آن ارائه شده است، از اینرو سایر پارامترهای مورد نیاز برای عنصر کابل در مدال عددی با معادلسازی روابط محیط سنگی برای محیط خاکی تعیین می‌گردند.



شکل ۵. مقطع مهارهای در محیط خاکی (Yeganeh et al., 2015)

$P =$ محیط مقطع شمع، K و $G =$ به ترتیب ضریب حجمی و برشی خاک مجاور بدنه شمع، $\Delta z_{min} =$ کوچکترین بعد ناحیه‌های شبکه تقاضا محدود عمود بر مرز بدنه شمع می‌باشند.

(پ) پارامترهای رفتار نرمال: برای شمع‌های بکار رفته در دیواره گودبرداری‌ها به دلیل شرایط بارگذاری جانبی باید علاوه بر خصوصیات فنر برشی، ویژگی‌های فنر نرمال نیز تعیین گردند.

(پ - ۱) رابطه (۱۰) توسط نگارندگان و مطابق پیشنهادهای موجود جهت تعیین مقاومت چسبندگی توصیه می‌شود (Luo et al., 2016).

$$cs_ncoh = 9c_{soil}.D_{pile} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه $D_{pile} =$ قطر شمع می‌باشد.

(پ - ۲) مقاومت اصطکاکی که به صورت تجربی مطابق رابطه (۱۱) برابر زاویه اصطکاک خاک در نظر گرفته می‌شود.

$$cs_nfri \approx \phi_{soil} \quad (۱۱)$$

(پ - ۳) برای شمع درجاریز، فضای خالی^{۱۰} بین بدنه شمع و خاک در نظر گرفته نمی‌شود.

(پ - ۴) عدم استفاده از مقدار مقاومت چسبندگی برای مقاومت کششی فنر نرمال، به خصوص برای شرایطی که محیط متفاوتی در دو سمت شمع وجود دارد همانند شمع - های بکار رفته در گودبرداری، بسیار مهم و ضروری است. از اینرو طبق نظر نگارندگان مقاله حاضر پیشنهاد می‌شود از مقدار حداکثر تنش کششی موجود در نرم‌افزار FLAC به شرح رابطه (۱۲) برای این پارامتر استفاده گردد.

$$cs_nten = \left(\frac{c_{soil}}{\tan(\phi_{soil})} \right).D_{pile} \quad (۱۲)$$

(پ - ۵) رابطه (۱۳) طبق نظر نگارندگان و با توجه به توضیحات دیگر مرجع (Luo et al., 2016)، برای تعیین

(Yung-Tsang, 2004).

(ب) پارامترهای رفتار برشی: رفتار برشی سطح مشترک بین شمع و خاک به صورت یک سیستم فنری لغزنده با پارامترهای مقاومت چسبندگی، مقاومت اصطکاکی و سختی که به ترتیب براساس روابط (۷)، (۸) و (۹) تعیین می‌شوند، مدل می‌گردد. این روابط مستقیماً در مرجعی بیان نشده است، بلکه براساس توضیحات و پیشنهادهای مراجع مختلف (Luo et al., 2007; Garala and Madabhushi, 2021) بدین صورت توسط نگارندگان مقاله حاضر نتیجه - گیری شده است. خلاصه مقادیر پارامترهای فنر برشی و نرمال برای مدل‌سازی عددی شمع پروژه حاضر در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. خلاصه مقادیر پارامترهای فنر برشی و نرمال

Vicinity	شمع			
	cs_sfric (Degree)	cs_scoh (N/m)	cs_ncoh (N/m)	cs_nten (N/m)
1 st layer	34	49311	141264	23270
2 nd layer	28	61639	176580	36900
3 rd layer	36	49311	141264	21604
	cs_sstiff (N/m/m)	6.4×10^{10}	cs_nstiff (N/m/m)	2.1×10^{10}

$$cs_scoh = \alpha.c_{soil}.p \quad (۷)$$

$$cs_sfric = \alpha.\phi_{soil} \quad (۸)$$

$$cs_sstiff = \left[10Max \left(\frac{K + G}{\Delta z_{min}} \right) \right].p \quad (۹)$$

که در این روابط $\alpha =$ مقدار این پارامتر بستگی به شرایط سطح شمع دارد، بطوریکه برای سطح زبر (مانند شمع درجاریز) برابر ۱، برای سطح نیمه زبر ۰/۵ و برای سطح کاملاً صاف مقداری نزدیک به صفر و یا صفر پیشنهاد شده است (Acosta et al., 2021). c_{soil} و $\phi_{soil} =$ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک مجاور بدنه شمع،

لنگر مقیاس شده می‌باشند. با استفاده از زیردستور *SEGMENT*، یک عنصر سازه‌ای می‌تواند به چند بخش تقسیم شود. افزایش تعداد بخش‌های عضو سازه‌ای منجر به افزایش دقت مدل‌سازی، دقت نتایج و البته زمان تحلیل می‌شود. برای مدل‌سازی قاب ساختمانی در نرم‌افزار *FLAC* از عنصر تیر^{۱۱} استفاده می‌شود. در تحلیل سازه باید سختی خمشی اعضای ترک خورده به نحو مناسبی محاسبه و منظور گردد. برای تعیین درصد تیرهای ترک خورده اقدام به تحلیل استاتیکی مدل ساختمان مجاور گودبرداری شده است. سپس با مقایسه لنگرهای حاصل از تحلیل با لنگر ترک خوردگی که از رابطه (۱۶) قابل محاسبه می‌باشد (Tunc, 2022)، ضریب ترک خوردگی تیرها مطابق جدول ۵ حاصل شده است.

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_i} \quad (16)$$

در این روابط، M_{cr} = لنگر خمشی ترک خوردگی، f_r = ضریب کسپختگی بتن، I_g = ممان اینرسی مقطع ترک نخورده، y_i = فاصله محور خشی در مقطع ترک نخورده از دورترین تار کششی، بدون در نظر گرفتن اثر آرماتورها می‌باشند.

جدول ۵. تعیین ضریب ترک خوردگی تیرها

Total Beams	Total Cracked Beams	Cracked Beams (%)	Coefficient of cracking
57	40	70	0.7

۲-۳. مدل‌سازی فونداسیون ساختمان

مدل‌سازی فونداسیون با ضخامت ۱/۶ متر و عرض ۳۷/۴۵ متر توسط ناحیه‌های شبکه تفاضل محدود و با پارامترهای ارائه شده در جدول ۶ صورت گرفته است.

جدول ۶. پارامترهای مدل‌سازی عددی فونداسیون

Volume coefficient (Pa)	Shear coefficient (Pa)	Specific Gravity (kg/m ³)	Behavior
-------------------------	------------------------	---------------------------------------	----------

سختی فنر نرمال پیشنهاد می‌شود.

$$cs_nstiff = \left[10Max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \right] D_{pile} \right] \quad (13)$$

۳-۳. مدل‌سازی قاب ساختمانی

انتخاب مقطعی از گود به همراه یک قاب براساس محل نصب انحراف‌سنج بر روی ستونی از ساختمان مجاور گودبرداری انجام شده است. در میحث اندرکش خاک - سازه فرض می‌گردد در شرایط استاتیکی و حین بارگذاری دینامیکی رفتار تمامی اعضای سازه و فونداسیون بتنی ارتجاعی باقی بماند (Bahuguna and Firoj, 2022). جهت منظور نمودن بارهای مرده و زنده کف طبقات در تحلیل‌های استاتیکی و لرزهای، جرم مخصوص تیرها مطابق رابطه (۱۴) اصلاح شده‌اند. البته برای ستون‌های قاب ساختمانی تنها از جرم مخصوص مصالح تشکیل دهنده آن استفاده می‌شود.

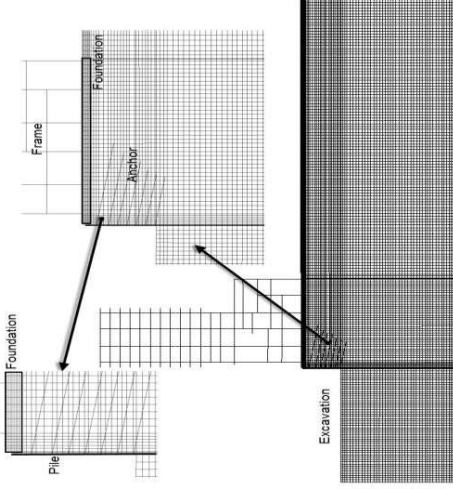
$$(DL + \alpha.LL) \times Spacing = Area \times \rho \quad (14)$$

که در این رابطه، DL = بار مرده و LL = زنده، $Spacing$ = فواصل منظم تکرار عناصر سازه‌ای در راستای عمود بر صفحه مدل عددی دو بعدی، α = ضریب کاهش بار زنده، به دلیل احتمال پایین همزمانی وقوع زلزله و وجود کل بار زنده در ساختمان، $Area$ = سطح مقطع تیر، ρ = جرم مخصوص می‌باشند. با توجه به دو بعدی بودن تحلیل و فاصله تیرها در راستای عمود بر صفحه مدل عددی، باید خواص آن‌ها توسط زیردستور *SPACING* اصلاح گردند. بنابراین در خروجی نرم‌افزار مقادیر واقعی نیروها و لنگرها مطابق رابطه (۱۵) با ضرب نتایج تحلیل عددی در فاصله تکرار اعضای سازه‌ای ارائه می‌شوند.

$$\lambda = \lambda_{Spacing} \cdot Spacing \quad (15)$$

که در این رابطه λ = نیرو یا لنگر واقعی، $\lambda_{Spacing}$ = نیرو یا

1.324×10^{10}	1.164×10^{10}	2500	Resilient
------------------------	------------------------	------	-----------



شکل ۸. نمایی از شبکه‌بندی مدل عددی

۳.۷. صحت‌سنجی مدل عددی

صحت‌سنجی نتایج مدل عددی پژوهش حاضر براساس داده‌های انحراف سنج نصب شده بر روی ستون ساختمان مجاور گودبرداری و همچنین نیروسنج قرار گرفته در محل مهارهای دیواره گود انجام شده است. در مبحث کج-شدگی ساختمان به دلیل نشست زمین، یکی از ابزارهای مناسب انحراف سنج^{۱۲} می‌باشد که زاویه کج‌شدگی (انحراف) را بدست می‌دهد. در شکل ۹ نمایی از این وسیله که در پروژه مرکز بین‌المللی مالی اقتصادی مشهد مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است.



شکل ۹. نمایی از Tiltmeter (Pollock et al., 2019)

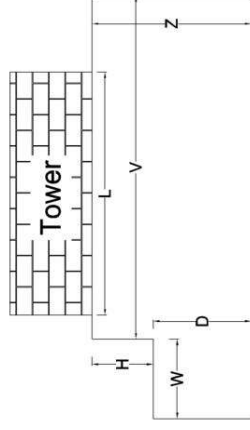
برای تحلیل داده‌ها، ابتدا سیگنال خروجی انحراف سنج مطابق رابطه (۱۷) از ولت^{۱۳} به درجه تبدیل می‌گردد و بدین صورت زاویه انحراف (α) تعیین می‌شود (Pollock et al., 2019).

$$\sin(\alpha) = m \times (V - b) \quad (17)$$

که در این رابطه V = سیگنال خروجی، برحسب ولت، b و

۳.۵. تعیین ابعاد هندسی و شبکه‌بندی مدل عددی

یکی از مراحل اساسی در مدل‌سازی‌های عددی تعیین محل مناسب مرزهای مدل هندسی می‌باشد، به نحوی که اثر این مرزها بر روی نتایج حاصله به کمترین مقدار خود برسد. جدول ۷ حاوی توصیه‌های مراجع مختلف برای پارامترهای معرفی شده در شکل ۷ می‌باشد و مقادیر انتخابی برای این پروژه نیز در جدول ۸ ارائه شده است. نتیجه نهایی شبکه‌بندی مدل پروژه حاضر نیز مطابق شکل ۸ می‌باشد.



شکل ۷. تعریف پارامترهای تعیین ابعاد هندسی مدل عددی

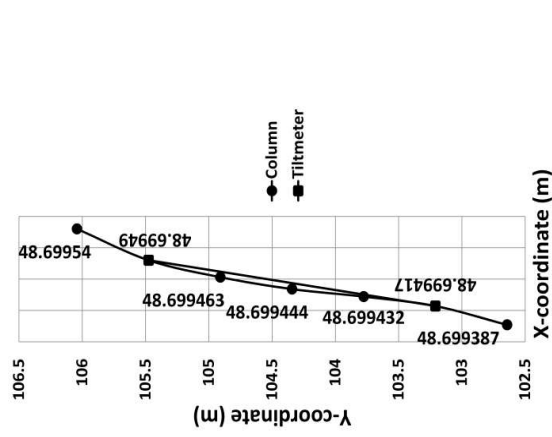
جدول ۷. پیشنهاد مقادیر پارامترهای تعیین ابعاد مدل عددی

Ref.	D	V	Z	W+V
(Zhang and Far, 2022)	-	-	Min: 30 m	5L
(Bybordiani and Arici, 2019)	3.5H	20W	-	-
(Yadegari et l., 2023)	(2- 3)H	(3- 4)(D+H)	-	-

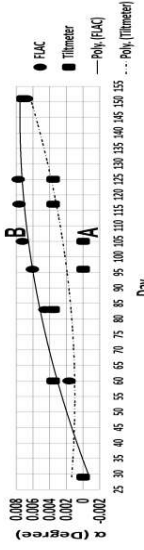
جدول ۸. ابعاد مدل عددی پژوهش حاضر (m)

H	W	D	V	Z
13	46	37	150	51.6

خاکبرداری نخستین ردیف مهاری‌ها مطابق شکل ۱۲ می‌باشد که براساس آن زاویه انحراف مبنا در مدل عددی تعیین می‌گردد.



شکل ۱۲. تغییر شکل ستون و زاویه انحراف مبنا در مدل عددی

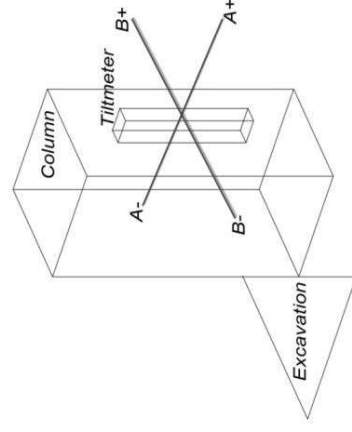


شکل ۱۳. مقایسه میزان کج‌شدگی قاب ساختمانی، حاصل از پایش و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FLAC

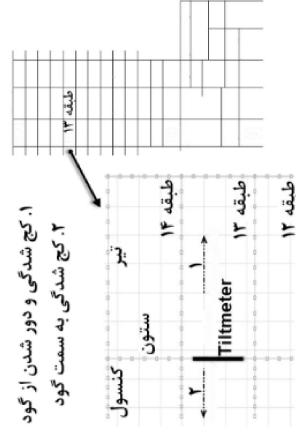
(الف) هر دو منحنی حاصل از تحلیل عددی و قرائت ابزار دقیق در مقادیر مثبت زاویه انحراف سیر می‌کنند که مطابق شکل ۱۰ به معنای دوران سازه در جهت دور شدن از محدوده گودبرداری می‌باشد. دور شدن سازه از گود در نتیجه تغییر شکل رو به بالای خاک زیر سازه مطابق شکل ۱۴ است. دلیل آن باربرداری حاصل از اجرای گودبرداری، قابل توجه بودن نیروی پس کشیدگی مهاری‌ها و عدم غالب شدن تغییر مکان جانبی دیواره گود بر تورم به دلیل سختی و

$m =$ ثابت‌های کالیبراسیون ارائه شده توسط شرکت سازنده می‌باشند.

مطابق شکل ۱۰، زاویه انحراف در راستای محور A به دلیل آنکه عمود بر دیواره گودبرداری می‌باشد، دارای اهمیت است. لازم به ذکر است که انحراف سنخ در ارتفاع حدود ۴۳ متری از تراز صفر زمین اطراف برج مطابق شکل ۱۱ نصب شده است. زاویه مربوط به تاریخ شروع عملیات خاکبرداری اولین ردیف مهاری به عنوان زاویه مبنا در نظر گرفته می‌شود و زاویه‌های مربوط به مراحل بعدی گودبرداری از زاویه یاد شده کسر می‌گردند.



شکل ۱۰. نحوه نصب انحراف سنخ بر روی ستون



شکل ۱۱. نمایی از محل قرارگیری انحراف سنخ و نحوه حرکت آن

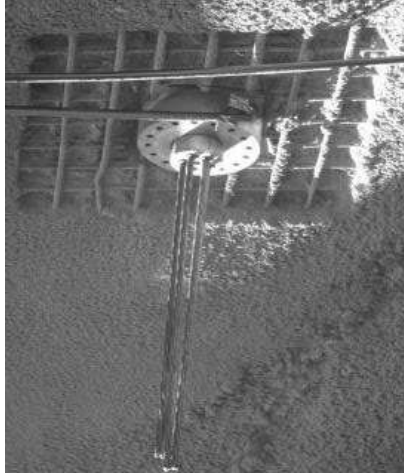
در هر مرحله از مدل‌سازی عددی که منطبق بر مراحل اجرایی نیز می‌باشد، مقادیر زاویه انحراف ستون برداشت می‌شود. به عنوان نمونه مختصات گره‌های ستون مورد نظر با طول $3/4$ متر و تعداد قطعات برابر ۶، قبل از شروع

صلبیت بالای سیستم سازه نگهدارنده می باشد.
 (ب) زاویه انحراف نسبت به مبنا در پایان عملیات گودبرداری براساس پایش و تحلیل عددی به ترتیب برابر ۰/۰۷۲ و ۰/۰۶۸ درجه می باشد.

(پ) بنا بر نکات فوق نتیجه می شود که مدل عددی با پارامترهای مفروض برای خاک دقت قابل قبولی در پیش بینی تغییرشکل های مجموعه خاک و سازه دارد.

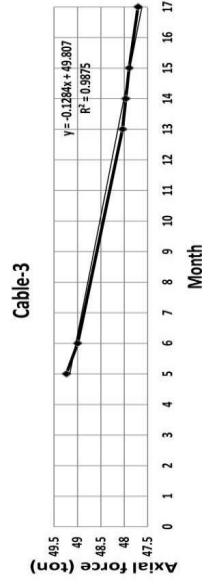
(ت) به دلایلی همچون اثرات سه بعدی و نیز تفاوت نحوه برداشت و مراحل اجرایی با مدل سازی عددی، انطباق کامل نتایج در حین اجرای عملیات گودبرداری امکان پذیر نمی باشد ولی تشابه و نزدیکی منطقی مقادیر آن ها به یکدیگر باید حاصل گردد.

در شکل ۱۳، نتایج مدل عددی و مقادیر حاصل از پایش سازه مجاور گودبرداری در زمینه کج شدگی ساختمان ارائه شده است. براساس مقایسه نتایج مدل FLAC و انحراف - سنج نکات زیر قابل بیان می باشد.



شکل ۱۵. نمایی از نیروسنج بکار رفته در پروژه مورد مطالعه

بعد از گذشت حدود ۵ ماه از اتمام کامل پایداری سازی گودبرداری به منظور تخمین نیروی مهاریها از بارسنج مطابق شکل ۱۵ استفاده شده است. در شکل ۱۶ نمودار تغییرات نیروی مهاریهی ردیف سوم در طی ۱۳ ماه قرائت نیروسنج مشاهده می گردد.

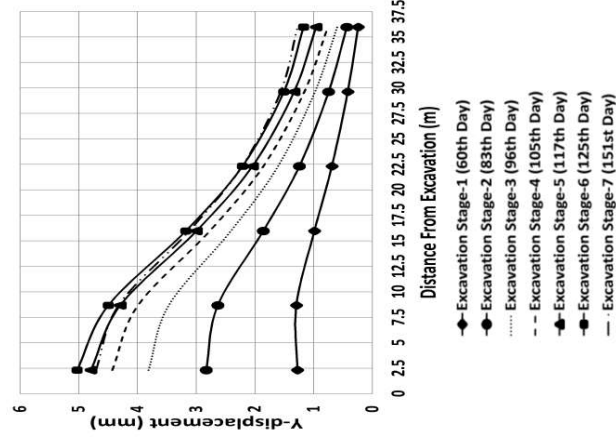


شکل ۱۶. تغییرات نیروی مهاریهی ردیف سوم براساس نیروسنج

جدول ۹. متوسط نیروی محوری مهاریها در مدل عددی

Number	1	2	3	4	5	6	7
(ton) Force	63.76	54.65	50.76	52.63	50.63	47.25	45.30

نیروی محوری مهاریهی ردیف سوم در انتهای تحلیل برگرفته از جدول ۹ برابر ۵۰/۷۶ تن می باشد که اختلاف ناچیزی در حدود ۰/۹۵ تن با مقدار حاصل از بیرونیابی قرائت ابزار دقیق (برای ماه شماره صفر) براساس معادله بدست آمده در شکل ۱۶ دارد. عملیات خاکبرداری و نصب مهاریها در مدت زمان کوتاهی حدود ۴ ماه اجرا شده اند.



شکل ۱۴. تغییر مکان قائم بای ستون ها بعد از هر مرحله

خاکبرداری جهت نصب ۷ ردیف مهاریهی

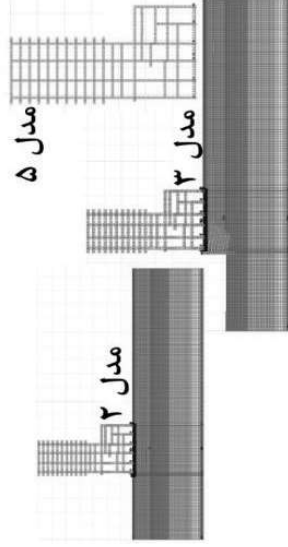
FLAC2D

۴. نتایج و بحث

تأثیر پدیده اندرکنش بر روی واکنش سازه ممکن است در مقایسه با واکنش سازه واقع بر تکیه‌گاه صلب، بسته به خصوصیات سازه و خاک، به صورت کاهش و تقبیل دهنده و یا به صورت افزایش و تقویت کننده باشد (Matsagar , 2022). در ادامه در هر بخش نتایج مدل‌های ۱ تا ۵ به همراه مقایسه بین آن‌ها ارائه می‌شود.

۴-۱. لنگر خمشی تیرهای قاب

نشست بی ممکن است شرایط توزیع بار جدیدی را در رو سازه بوجود آورد بطوریکه موجب آسیب، ترک برداشتن و حتی تغییر علامت نیروهای داخلی اعضا گردد. در این قسمت نتایج مربوط به مدل‌های ۲، ۳ و ۵ (شکل ۱۸) به دلیل وجود قاب سازه‌ای در آن‌ها ارائه می‌گردد.



شکل ۱۸. نمایی از مدل‌های ۲، ۳ و ۵ در فضای نرم‌افزار

FLAC2D

لنگر ابتدا و انتهای تمامی تیرها در اولین دهانه از سمت چپ قاب خمشی ۱۷ طبقه و در ترازهای مشخص شده در شکل ۱۷ از نتایج تحلیل با نرم‌افزار FLAC برداشت و در شکل ۱۹ و شکل ۲۰ ارائه شده است. با بررسی این دو شکل، نتایج زیر حاصل می‌گردد:

- مقایسه لنگر بین مدل‌های اندرکنشی با مدل ۵ نشان

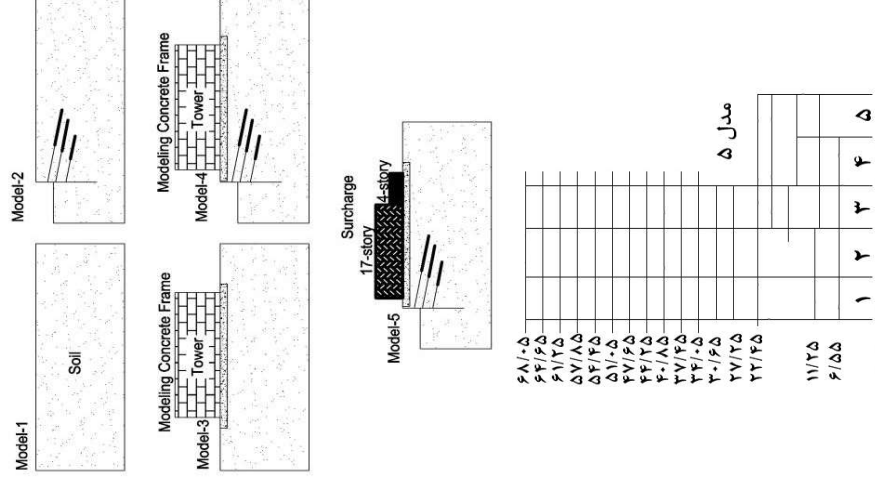
دهنده اثر قابل ملاحظه در نظر گرفتن اندرکنش با

افزایش ۲/۲ برابری این پارامتر می‌باشد.

به همین دلیل از اثر خزش در مدل‌سازی عددی صرف‌نظر شده است. اما می‌توان با یافت شیب معادله خط براساس دو ماه ابتدایی فرانت نیروسنج‌ها که برابر ۰/۲۴- می‌باشد، به شکل ساده‌ای تخمینی از اثرات خزش بر کاهش نیروی مهارى را بدست آورد. در این شرایط مشاهده می‌شود که مقدار حاصل از تحلیل عددی (۴۹/۸ تن) و ابزار دقیق (۴۹/۸۰۷ تن) مطابقت بسیار خوبی دارند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل عددی این پژوهش است.

۴-۳. معرفی مدل‌های عددی

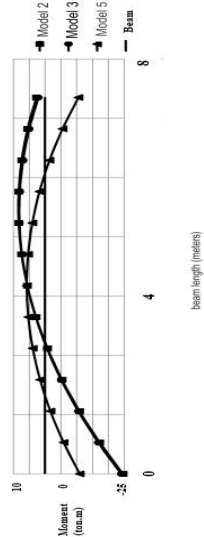
در این پژوهش ۵ مدل به شرح شکل ۱۷ معرفی شده‌اند که توضیح مدل‌های ۱ تا ۵ به ترتیب به صورت مدل بدون سربار، مدل اندرکنش خاک - سازه، مدل اندرکنش ساختمان - گودبرداری، مدل سربار و مدل با تکیه‌گاه ثابت می‌باشد.



شکل ۱۷. تصویر شماتیک ۵ مدل عددی در نرم‌افزار

متر.

- گودبرداری باعث تغییر ناچیزی در لنگر خمشی تیر نسبت به مدل ۲ شده و تغییر علامت لنگر در این دو مدل نسبت به هم نیز رخ نداده است.
- لنگر خمشی در مدل ۲ نسبت به مدل ۵ حداکثر ۶/۵۲ برابر شده است. حداکثر تغییر علامت لنگر در انتهای تیر (سمت راست شکل ۲۱) و با تغییر از ۳ تن متر در مدل ۲ به ۱۱- تن متر در مدل ۵ می-باشد.
- لنگر خمشی در مدل ۳ نسبت به مدل ۵ حداکثر ۶/۲۷ برابر شده است. حداکثر تغییر علامت لنگر در انتهای تیر و با تغییر از ۲ تن متر در مدل ۳ به ۱۱- تن متر در مدل ۵ می‌باشد.

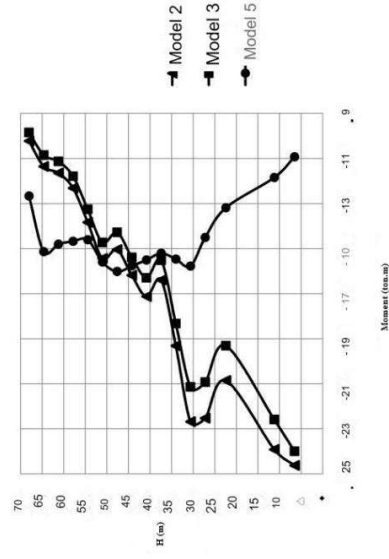


شکل ۲۱. نمودار لنگر خمشی استاتیکی تیر تراز ۶/۵۵ متری

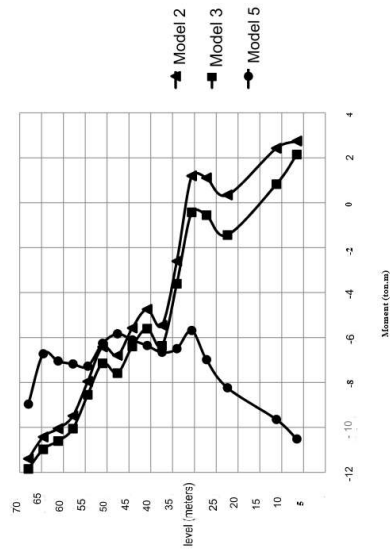
- (ب) تیر در اولین دهانه‌ی آخرین طبقه قاب - طول ۶/۳۵ متر.

- گودبرداری باعث تغییر ناچیزی در لنگر خمشی تیر نسبت به مدل ۲ شده است.
- اختلاف بسیار ناچیزی بین مقادیر لنگر خمشی مدل‌های ۲ و ۳ با مدل ۵ وجود دارد.
- در سه مدل تغییر علامت لنگر نسبت به هم رخ نداده است.

- اختلاف لنگر در مدل ۵ نسبت به مدل‌های ۲ و ۳ به تدریج در ترازهای بالاتر از ارتفاع حدود ۳۵ متری کاهش می‌یابد.
- در تمامی ترازهای مدل ۵ برخلاف مدل‌های اندرکنشی علامت لنگر بدون تغییر و به صورت منفی می‌باشد.



شکل ۱۹. لنگر خمشی گره ابتدایی کلیه تیرهای اولین دهانه قاب



شکل ۲۰. لنگر خمشی گره انتهایی کلیه تیرهای اولین دهانه قاب

- در ادامه به بررسی نمودار لنگر خمشی دو تیر انتخابی در ترازهای مختلف قاب مد نظر براساس شکل ۱۷ پرداخته شده است.

(الف) تیر در اولین دهانه‌ی نخستین طبقه قاب - طول ۶/۳۵

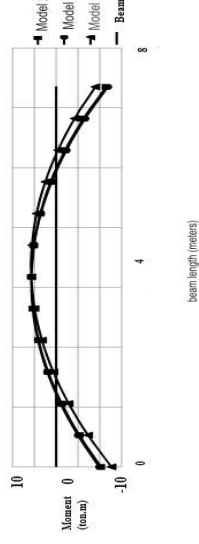
(Hamedmirjafari et al., 2019)

Variable	sandy soil	clay soil
Displacement ratio on excavation height	0.002	0.003

۲-۲-۴. تغییرشکل شمع

عملیات گودبرداری مورد مطالعه دارای ۷ مرحله خاکبرداری و نصب مهاریه می‌باشد. به عنوان نمونه تغییرشکل شمع در مدل‌های ۱، ۳ و ۴ بعد از خاکبرداری مرحله پنجم و پس از پایان عملیات گودبرداری در شکل ۲۴ و شکل ۲۵ ارائه شده است. نتایج حاصل از تفسیر این شکل‌ها به شرح زیر می‌باشند.

- در شرایط استاتیکی مقادیر تغییرمکان جانبی شمع در هر سه مدل مورد بررسی کوچک و حداکثر برابر ۰/۷ سانتیمتر می‌باشد. همان‌گونه که در تفسیر دور شدن سازه از گودبرداری مجاور آن براساس شکل ۱۳ نیز بیان گردید، عدم غالب شدن تغییرمکان جانبی دیواره گود بر تورم به دلیل سختی و صلبیت بالای سیستم سازه نگهدارنده و نیروی پس‌کشیدگی قابل توجه مهاریه‌ها بوده است، که نتایج این قسمت نیز صحنه بر درستی تفسیر داده‌های ابزار دقیق و دقت بالای مدل‌های عددی دارد. مقادیر کوچک جابه‌جایی افقی دیواره گود در طی مراحل اجرای عملیات گودبرداری در پژوهش سایر محققین نیز اشاره شده است (Santos et al., 2008).
- تغییرشکل شمع هر سه مدل در زیر تراز گودبرداری و تمامی مراحل عملیات تقریباً یکسان است.
- در بالای تراز کف گود، مقادیر مدل ۴ اندکی بیشتر از مدل ۳ و تغییرشکل شمع در مدل ۱ متفاوت از دو مدل ۳ و ۴ است.
- در کلیه مدل‌ها محدودیت ۰/۰۲۵ ارتفاع گود در

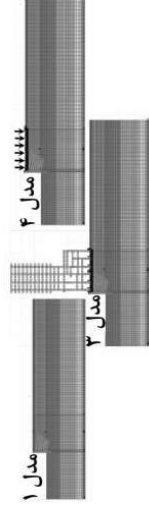


شکل ۲۲. نمودار لنگر خمشی استاتیکی تیر تراز ۶۷/۰۵ متری

متری

۲-۲-۴. تغییرشکل دیواره گودبرداری

یکی از اهداف اجرای سازه‌های نگهدارنده محدود نمودن مقادیر جابه‌جایی در حین و پایان عملیات گودبرداری به مقادیر مجاز می‌باشد تا سازه‌های مجاور با کمترین میزان تغییرشکل مواجه شوند. در این قسمت نتایج مربوط به مدل‌های ۱، ۳ و ۴ مطابق شکل ۲۳ به دلیل مدل‌سازی گودبرداری در آن‌ها ارائه می‌گردد.



شکل ۲۳. نمایی از مدل‌های ۱، ۳ و ۴ در فضای نرم‌افزار

FLAC2D

۲-۲-۴. محدودیت‌های جابه‌جایی دیواره گود

با توجه به محدودیت‌های زیر و وجود خاک مخلوط ماسه و رس در محل پروژه از معیار ۰/۰۲۵ ارتفاع گود استفاده شده است.

(الف) بطور کلی برای هر نوع سازه نگهدارنده، حداکثر تغییرشکل افقی و قائم دیواره به اعداد جدول ۱۰ محدود می‌گردند. (ب) حداکثر جابه‌جایی جانبی دیوار مهارشده در زمین ماسه‌ای و رس بین ۰/۲ تا ۰/۵ درصد ارتفاع گود توصیه شده است (Arabanezhad and Fakher, 2021).

جدول ۱۰. میزان مجاز نسبت جابه‌جایی به ارتفاع گود

شکل ۲۵. تغییر شکل شمع بعد از خاکبرداری مرحله هفتم

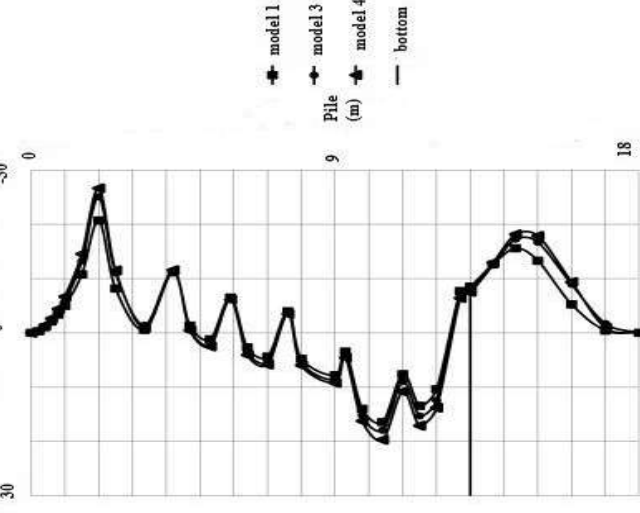
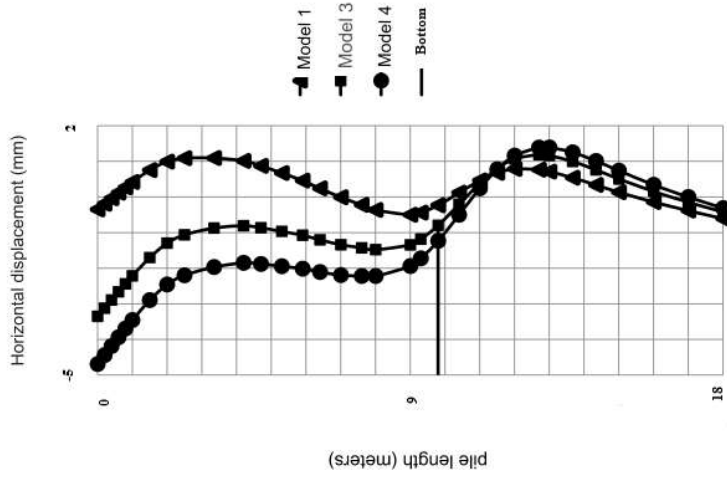
(پایان عملیات گودبرداری)

۳-۲-۴. لنگر خمشی شمع

بعد از اتمام خاکبرداری، نصب مهاریها و تحلیل مدل‌های ۱، ۳ و ۴، نمودار لنگر خمشی بر طبق شکل ۲۶ حاصل شده است که براساس آن نتایج زیر بدست می‌آیند.

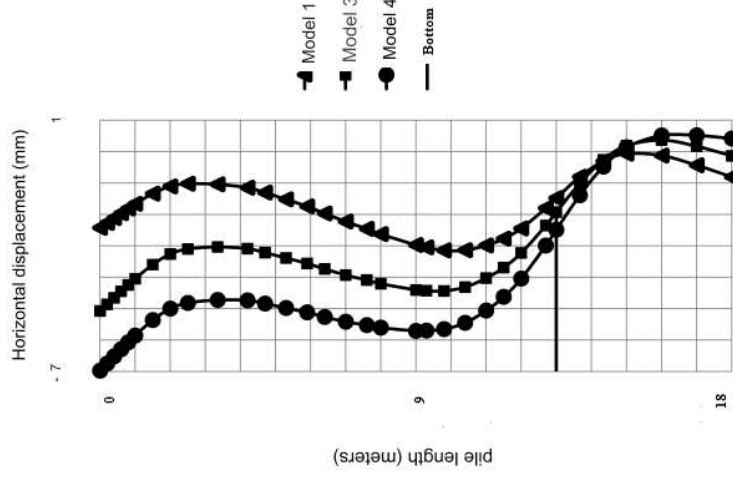
- نمودار لنگر خمشی برای هر سه مدل از نظر شکل و مقدار تقریباً یکسان می‌باشد.
- حداکثر مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در شمع در هر سه مدل ۱، ۳ و ۴ در عمق ۲ متری از بالای شمع (یک نهم طول شمع) و به ترتیب برابر ۲۱-، ۲۵- و ۲۷- تن متر حاصل شده است.

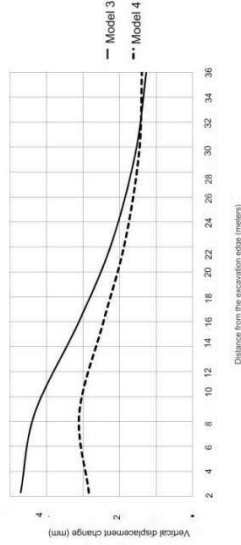
هر مرحله از اجرا ارضا شده است.



شکل ۲۶. لنگر خمشی شمع در پایان عملیات گودبرداری

شکل ۲۴. تغییر شکل شمع بعد از خاکبرداری مرحله پنجم





شکل ۲۸. تغییر مکان پای ستون‌ها بعد از خاکبرداری مرحله

هفتم

۵. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی کلیه مدل‌های این پژوهش را می‌توان در دو بخش کلی قاب ساختمانی و سازه نگهدارنده گودبرداری بیان نمود.

الف) قاب ساختمانی:

- نشست نامتقارن بر شرایط نیروهای داخلی قاب ساختمانی تأثیرگذار است و در صورت عدم مدل‌سازی ساختمان از بررسی این موضوع مهم صرف‌نظر می‌شود. این در حالی است که تحلیل رفتار سازه با صرف‌نظر نمودن از پدیده اندرکش خاک - سازه دارای خطای زیادی می‌باشد.

- گودبرداری منجر به تغییر ناچیزی در مقادیر لنگر

خمش استاتیکی تیرها نسبت به مدل اندرکش

خاک - سازه شده است. دلیل عدم تأثیر قابل

ملاحظه گودبرداری بر مقادیر لنگر را می‌توان در

سختی و صلیب بالای سیستم سازه نگهدارنده

حاضر که منجر به عدم ایجاد تغییر مکان‌های جانبی

بسیار بزرگ شده است، جستجو نمود.

- لنگر خمش در اکثر نقاط قطعات تیر ترازهای

تحتانی سازه مدل‌های اندرکشی بیشتر از مدل با

پای ثابت می‌باشد، هر چند در ترازهای بالایی

اختلاف بسیار ناچیزی مابین مقادیر لنگر این مدل‌ها

وجود دارد.

- با افزایش ارتفاع قرارگیری تیرها از تراز فونداسیون،

۵-۲-۴. نیروی محوری مهارها

تفسیر تغییرات نیروی محوری مهارها براساس شکل ۲۷ مطابق موارد زیر می‌باشد.

- عملکرد مهارهای فوقانی و تحتانی در بسیج

نمودن نیروی محوری متفاوت و کاهش نیروی مهارها قابل مشاهده است.

- در صورت مقایسه نیروی محوری مهارها در مدل

عددی برگرفته از جدول ۹ با مقدار نیروی پس

کشیدگی ارائه شده در بخش ۱.۶، اختلافی بین ۵ تا

۱۵ تن مشاهده می‌گردد. این تفاوت نیرو به دلیل

مختلفی از جمله جابه‌جایی دیواره گود، اعمال

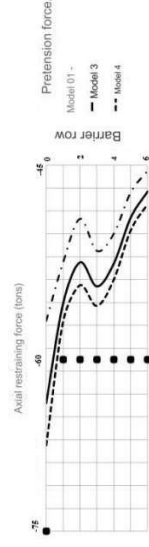
سرپار، جابه‌جایی محوری مهار در طول گیرداری،

عدم پیوستگی مناسب بین دوغاب و خاک احاطه-

کننده مهار، وجود خاک شل و بی‌کیفیت، اثرات

خزش و باز توزیع تنش‌ها در اثر اجرای مهارهای

ردیف‌های تحتانی می‌باشد.



شکل ۲۷. نیروی محوری مهارها بعد از اتمام عملیات

گودبرداری

۵-۲-۴. پروفیل تغییر شکل قائم

در شکل ۲۸، پروفیل تغییر شکل قائم براساس تغییر مکان

پای ستون‌های سازه بعد از خاکبرداری مرحله هفتم در دو

مدل ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نوع

مدل‌سازی سازه مجاور گود بر نحوه تغییر شکل خاک زیر

بسی تأثیر بسزایی دارد.

قدردانی

در انتها لازم است از مدیریت هماهنگی پروژه مرکز بین-المللی مالی اقتصادی مشهد جناب آقای مهندس بدخشانی، شرکت بناگستران هشتم توس، شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک (SES)، جناب آقای مهندس چترانی مسئول دفتر فنی شرکت SES در عملیات گودبرداری پروژه یاد شده و شرکت مهندسين مشاور رهداد به خاطر همکاری صمیمانه، جهت در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی گردد.

پانویسها

- 1) Fixed Base
- 2) Laminated Beam
- 3) Multistep Method
- 4) Modulus Number
- 5) Modulus Exponent
- 6) Cable Element
- 7) Anchor
- 8) Bond
- 9) Rockbolts
- 10) Gap
- 11) Beam Element
- 12) Tiltmeter
- 13) Volts
- 14) Load Cell

موارد تغییر علامت لنگر بین سه مدل با تکیه‌گاه ثابت، اندرکنش خاک - سازه و اندرکنش ساختمان - گودبرداری به تدریج کاهش می‌یابد، بطوریکه در تراز بام کاملاً از بین می‌رود.

- لنگر خمشی ناشی از اختلاف نشست تکیه‌گاه‌ها بر اثر در نظر گرفتن اندرکنش از طبقات پایین به بالای ساختمان‌های بلند مرتبه، کاهش می‌یابد.

(ب) سازه نگهبان گودبرداری:

- در شرایط استاتیکی، مقادیر تغییرمکان جانبی شمع در هر سه مدل مورد بررسی کوچک است. عدم غالب شدن تغییرمکان جانبی دیواره گود بر تورم به دلیل سختی و صلبیت بالای سیستم سازه نگهبان و نیروی پس کشیدگی قابل توجه مهارها بوده است.
- نوع مدل‌سازی سازه مجاور گود به صورت سربار و یا قاب ساختمانی تأثیر چندانی بر نحوه تغییرشکل دیواره گود، جابه‌جایی‌های جانبی کل مدل، لنگر خمشی شمع و تغییرات نیروی محوری ایجاد شده در مهارها در تحلیل‌های استاتیکی ندارد.

- مدل‌سازی سازه به صورت سربار یا قاب ساختمانی تأثیر بسزایی بر نحوه تغییرشکل خاک زیر پی در طی هر یک از مراحل عملیات گودبرداری دارد.

(پ) در انتها قابل ذکر است که براساس نتایج حاصل از این پژوهش در صورتیکه هدف تحلیل و طراحی سازه نگهبان گودبرداری در شرایط استاتیکی باشد، مدل‌سازی سازه مجاور گود به صورت قاب ساختمانی تأثیر چندانی بر نتایج به جز نحوه تغییرشکل خاک زیر پی نخواهد داشت و می‌توان از روش اعمال اثر سازه به صورت سربار استفاده نمود. اما زمانیکه تأثیر اندرکنش و گودبرداری بر نیروهای داخلی ساختمان مدنظر باشد، مدل‌سازی قاب سازه‌ای الزامی است.

منابع

- Acosta, J.G., Vardon, P.J. and Hicks, M.A., 2021. Study of landslides and soil-structure interaction problems using the implicit material point method. *Engineering Geology*, 285, p.106043.
- Akhtarpour, A. and Mortezaee, M., 2019. Dynamic response of a tall building next to deep excavation considering soil-structure interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(4), pp.479-502.
- Arabanezhad, A. and Fakher, A., 2021. A practical method for rapid assessment of reliability in deep excavation projects. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 45(1), pp.335-357.
- Ayar, P., Baradaran, S. and Abdipour Vosta, S., 2022. A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Road*, 30(110), pp.57-86.
- Bahuguna, A. and Firoj, M., 2022, October. Numerical simulation of seismic response of Slope-Foundation-Structure interaction for mid-rise RC buildings at various locations. In *Structures* (Vol. 44, pp. 343-356). Elsevier.
- Balighi, M., Baradaran, M.S. and Akhtarpour, A., 2024. Numerical investigation of swelling soil behavior and its effect on gas well casing internal forces based on unsaturated soil mechanics, case study: Khangiran, Sarakhs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.
- Baradaran, M. S., Aftabi Sani, A., Abrishami, S. (2024). 'Application of Differential Transform Method for Solving Free-Surface Seepage Problem of One-Dimensional Porous Media', *Ferdowsi Civil Engineering*, 37(1), pp. 1-18.
- Baradaran, M.S., Qazanfari, R. and Baradaran, S., 2023. Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Materials Research Express*, 10(5), p.05202.
- Baradaran, S. and Ameri, M., 2023. Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies. *Road*, 31(114), pp.53-70.
- Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M. and Maleki, A., 2024. Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e02740.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M., 2012. Plaxis 3D material models manual. Plaxis bv.
- Bybordiani, M. and Arici, Y., 2019. Structure-soil-structure interaction of adjacent buildings subjected to seismic loading. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(7), pp.731-748.
- Finno, R.J., Voss Jr, F.T., Rossow, E. and Blackburn, J.T., 2005. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(10), pp.1199-1210.
- Garala, T.K. and Madabhushi, G.S., 2021. Role of pile spacing on dynamic behavior of pile groups in layered soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(3), p.04021005.
- Hamedmirjafari, B., Bolouri Bazaz, J. and Abrishami, S., 2019. Experimental investigation of bond stress and creep displacements of GFRP soil nails simulated in a soil box. *International Journal of Civil Engineering*, 17, pp.1559-1570.
- Ibrahim, K.M.H.I. and Ibrahim, T.E., 2013. Effect of historical earthquakes on pre-stressed anchor tie back diaphragm wall and on near-by building. *HBRC Journal*, 9(1), pp.60-67.
- Itasca, U.D.E.C. and Code, U.D.E., 2011. Version 5.0, Itasca Consulting Group. Inc., *Minneapolis*.
- Kempfert, H.G. and Gebreselassie, B., 2006. Supported excavations in soft soil deposits. *Excavations and Foundations in soft soils*, pp.117-273.
- Luo, C., Yang, X., Zhan, C., Jin, X. and Ding, Z., 2016. Nonlinear 3D finite element analysis of soil-pile-structure interaction system subjected to horizontal earthquake excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, pp.145-156.
- Luo, W.L., Liu, C.W. and Han, X., 2007. Numerical simulation of behaviour of piled foundation influenced by tunneling. *Rock and Soil Mechanics*, 28(S1), pp.403-407.
- Matsagar, V., 2022. Earthquake Engineering and Technology. In *Theory and Practice in Earthquake Engineering and Technology* (pp. 1-53). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Mercado, J.A., Mackie, K.R. and Arboleda-Monsalve, L.G., 2021. Modeling nonlinear-inelastic seismic response of tall buildings with soil-structure interaction. *Journal of Structural Engineering*, 147(7), p.04021091.
- Mroueh, H. and Shahrour, I., 2003. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction. *Computers and Geotechnics*, 30(3), pp.245-253.

- Pargar, J., Akhtarpour, A. and Baradaran, M.S., 2024. An Unsaturated Soil Mechanics-Based Numerical and Experimental Method to Assess Soil Settlement Due to Ground Water Level Rise. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp.1-26.
- Pegah, E. and Liu, H., 2020. Evaluation of hyperbolic stress-strain and bulk-modulus model parameters in granular soil mass using seismic surveying. *Engineering Geology*, 266, p.105456.
- Pollock, C., Javor, J., Stange, A., Barrett, L.K. and Bishop, D.J., 2019. Extreme angle, tip-tilt MEMS micromirror enabling full hemispheric, quasi-static optical coverage. *Optics express*, 27(11), pp.15318-15326.
- Pournoori, P., Davarpanah TQ, A., Rajaei, A., Ghodratnama, M., Abrishami, S. and Masoodi, A.R., 2024. Experimental exploration of fracture behavior (pure mode III) in eco-friendly steel fiber-reinforced self-compacting concrete with waste tempered glass as coarse aggregates. *Scientific Reports*, 14(1), p.9043.
- Reissner, E., 1936. Stationäre, axialsymmetrische, durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes. *Ingenieur-Archiv*, 7(6), pp.381-396.
- Santos, M.D., Danziger, B.R. and Sicira, A.C., 2008, October. A case of Numerical Analysis of Settlements due to Excavation on Nearby Structures. In *Proceedings, The* (Vol. 12, pp. 3849-3857).
- Tabaroei, A., Sarfarazi, V., Pouraminian, M. and Mohammadzadeh, D., 2022. Evaluation of behavior of a deep excavation by three-dimensional numerical modeling. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(3), pp.967-977.
- Talalay, P.G. and Hong, J., 2021. Perspectives for development of ice drilling technology: continuation of the discussion. *Annals of Glaciology*, 62(84), pp.143-156.
- Tareghian, B., Baradaran, M.S. and Akhtarpour, A., 2024. The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil. *Discover Geoscience*, 2(1), p.11.
- Tunc, G. and Tunc, T.E., 2022. A Close Examination of Ankara's Reinforced Concrete Buildings Designed and Constructed between 1923 and 1938. *Buildings*, 13(1), p.46.
- Yadegari, S., Yazdandoust, M. and Momenyan, M., 2023. Performance of helical soil-nailed walls under bridge abutment. *Transportation Geotechnics*, 38, p.100788.
- Yazdi, A.N., Akhtarpour, A., Abdalhussein, M.M. and Baradaran, M.S., 2024. Experimental investigation of the volume change of a swelling clay and its improvement. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(3), pp.1008-1031.
- Yeganeh, N. and Fatahi, B., 2018, July. Seasonal effects on seismic performance of high rise buildings considering soil-structure interaction. In *Proc. of the 16th European Conf. on Earthquake Engineering*.
- Yeganeh, N., Akhtarpour, A. and Bolouri Bazaz, J., 2015. Parameters determination of soil-anchor interaction for numerical modelling according to field data. *Modares Civil Engineering Journal*, 15(4), pp.105-116.
- Yung-Tsang, C., 2004. Lateral load analysis of single piles. *University of California*.
- Zhang, X. and Far, H., 2022. Effects of dynamic soil-structure interaction on seismic behaviour of high-rise buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(7), pp.3443-3467.