

بررسی تاثیر استفاده از ترکیب سیستم‌های دیوار دیافراگمی و مهاربند پیش تنیده (انکراژ) در پایدارسازی گودبرداری‌های عمیق در شهر اهواز

امین خورشیدپناه^{*۱}، محمدرضا نیسی دغلاوی^۲، عبدالحسین بیت سخر^۳، وحید حاتمی دزدارانی^۴

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه جهاد دانشگاهی استان خوزستان

۲- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه جهاد دانشگاهی استان خوزستان

۴- کارشناس ارشد عمران، گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر

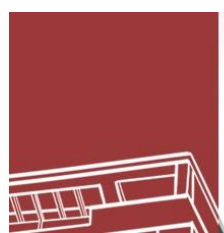
خلاصه

در سال‌های اخیر به علت شتاب گرفتن ساخت و ساز ساختمان‌های بلند در اکثر کلان شهرها، گودبرداری‌های عمیق و نیمه عمیق در پروژه‌های عمرانی انجام می‌شود. پایدارسازی جداره گود جزو ضروریات یک پروژه می‌باشد که در مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان نیز به آن اشاره شده است. در این پژوهش، سیستم دیوار دیافراگمی با انکراژ در جهت حفاظت گودبرداری‌های عمیق ساختمان مرکزی بانک صادرات اهواز در خاک‌های رسی و ماسه‌ای، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های انجام شده نشان داد که مقدار ضریب اطمینان پایداری گود با استفاده از دیوار دیافراگمی و بدون انکر، مناسب می‌باشد. این بررسی نشان می‌دهد که از نظر پایداری گودبرداری و لغزش، استفاده از دیوار دیافراگمی بدون انکر نیز کفایت می‌کند. علاوه بر این، استفاده از انکر به تنهایی، ضریب اطمینان مناسبی را جهت پایداری لغزش گود، بدست نمی‌دهد. در حالت استفاده همزمان از دیوار دیافراگمی و انکر، مقادیر ضریب اطمینان بسیار مناسب می‌باشد. نتایج تحلیل‌های عددی انجام شده همچنین نشان داد که در مدل بدون دیوار و انکر، فروریزش گود رخ داده و لزوم استفاده از یک سیستم پایدارسازی گود، اثبات می‌شود. در مدل با سیستم دیوار دیافراگمی به ضخامت ۸۰ سانتی‌متر، فروریزش گود اتفاق نمی‌افتد و این روش به تنهایی و بدون استفاده از انکر نیز جوابگو می‌باشد.

کلمات کلیدی: دیوار دیافراگمی، پایدارسازی گود، گودبرداری، مهاربند پیش تنیده، انکراژ

۱. مقدمه

از مهمترین مشکلات در ساخت و سازهای شهری، حفاظت از گودها و ساختمان‌های مجاور آن می‌باشد که در صورت عدم رعایت روش‌های مناسب حفاظت از گودها، منجر به خسارات جبران ناپذیری می‌گردد. روش‌های مختلفی در پایدارسازی گودها مانند دیوار دیافراگمی، نیلینگ، انکراژ، سپرکوبی، مهار متقابل و یا ترکیبی از این روش‌ها وجود دارد. یکی از سیستم‌های حفاظت جانبی برای گودبرداری‌ها استفاده از دیوارهای حائل دیافراگمی است. دیوارهای دیافراگمی دسته‌ای از دیوارهای حائل از جنس بتن مسلح می‌باشند که با حفر ترانشه‌های عمیق ساخته می‌شوند و به دلیل سرعت اجرا و ایمنی کافی از



سازه‌های نگهبان مناسب و قابل اطمینان محسوب می‌شوند. این دیوارها برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۵۰ در کشور ایتالیا به کار برده شدند، سپس استفاده از آنها در آمریکا رواج یافت. امروزه به دلیل افزایش ساخت و ساز شهری در مناطق با تراکم بالا علی‌الخصوص در مناطقی که سطح آب زیرزمینی در لایه‌های بالاتری قرار دارد، از دیوارهای دیافراگمی برای ایستگاه‌های زیرزمینی و گودبرداری عمیق به منظور پایداری گود، جلوگیری از نشست سطح زمین، خطر آفرین بودن روش‌های مرسوم پایداری، زمان بر بودن پروژه انجام روش‌های متداول پایداری و بالا بودن تراز سطح آب‌های زیرزمینی که از مهم‌ترین رویدادهای ناشی از گودبرداری است با کاربری موقت یا دائم، بهره می‌گیرند. روش دیگری که به منظور پایداری دیوارها استفاده می‌شود روش مهاربند پیش‌تنیده یا انکراژ می‌باشد. انکرها همان‌های سازه‌ای پیش‌تنیده‌ای هستند که در خاک یا سنگ نصب شده و نیروی کششی ایجاد شده مشخصی را توسط رشته‌های استرند و یا میلگرد فولادی در ناحیه باند خود به توده خاک و در خارج از گوه لغزش منتقل می‌نمایند. تفاوت استفاده از انکر با میخکوبی در خاک در این است که در انکر قبل از هر گونه حرکت توده، نیروی پیش‌تنیدگی بزرگی وجود دارد که باعث کاهش تغییر شکل می‌گردد ولی در میخکوبی، نیروی پیش‌تنیدگی بزرگی به همان نیل اعمال نمی‌شود و حرکت توده خاک موجب ایجاد نیرو در دیوار می‌گردد. لذا در مواردی که کنترل تغییر شکل اهمیت زیادی دارد، استفاده از انکر همراه با دیوار دیافراگمی جهت پایداری توصیه می‌گردد. به دلیل مکانیزم عملکرد، به سیستم انکراژ، دوخت به پشت نیز گفته می‌شود [۱].

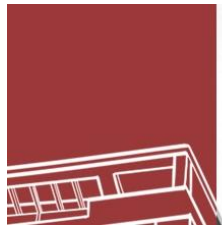
در این پژوهش، سیستم دیوار دیافراگمی با انکراژ در جهت حفاظت گودبرداری‌های عمیق ساختمان مرکزی بانک صادرات اهواز در خاک‌های رسی و ماسه‌ای، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. از آنجا که تا کنون در شهر اهواز هیچ رفتار میدانی در طول فعالیت‌های گودبرداری عمیق تا زمان انجام این تحقیق گزارش نشده بود، تصمیم گرفته شد که برنامه تحقیقاتی به منظور مستندسازی آن آغاز شود. به این منظور چند دیوار در بخش‌هایی از گود ساختمان، که زمین‌شناسی آن‌ها نمونه‌ای از گود ساختمان است، برای تحلیل نشست‌های سطحی و تغییر شکل دیوار جانبی ناشی از گودبرداری انتخاب شدند. در شهر اهواز به دلیل بالا بودن سطح آب زیر زمینی و به دلیل نفوذناپذیر بودن دیوار در برابر جریان آب، پشت دیوار دیافراگمی، گرا دیان هیدرولیکی به وجود می‌آید که باعث برقراری جریان آب می‌گردد. جریان آب در خاک باعث تغییر در تنش موثر و تغییر تنش موثر باعث تغییر در جابجایی‌ها و نیروهای داخلی دیوار و مهارها می‌شود و به همین علت بررسی جابجایی و رفتار دیوار در حضور آب لازم به نظر می‌رسد.

۲. سازه‌های نگهبان

از آنجایی که همواره در پروژه‌های ساختمانی با گودبرداری عمیق، احتمال ریزش دیواره گود وجود دارد، بررسی و شناخت دقیق لایه‌های خاک و طراحی دقیق سازه نگه دارنده‌ی گود اهمیت بسیار زیادی داشته و گاهی زمان زیادی صرف مطالعات ژئوتکنیک و طراحی سازه نگهبان می‌گردد. برخلاف تصور اشتباه عوام، اجرای سازه نگهبان باید قبل از خاک‌برداری و در برخی موارد، حتی قبل از تخریب سازه قدیمی صورت گیرد. چرا که هدف اصلی از احداث سازه نگهبان، محافظت از خاک دیواره گود برداری است. این در حالی است که برخی افراد غیر متخصص در مورد گودهای کم‌عمق در مناطق مسکونی، به تصور مهار دیوار همسایه مجاور گود، اقدام به اجرای مهارهای نامناسب با گچ و الوار به دیوار همسایه، پس از گود برداری نموده اند که منجر به حوادث تلخ و جبران ناپذیری شده است [۲].

بر اساس دانش مهندسی و بررسی‌های انجام شده یکی از روش‌های زیر یا ترکیبی از آن‌ها برای پایداری سازه دیواره گودها تعیین می‌شود [۲]:

۱) روش اجرای سپر خاکی (گود برداری محافظت نشده)



۲) روش سازه نگهبان خرابایی^۱

۳) روش مهار فشاری (مهار متقابل) دیوارهای گود^۲

۴) روش میخ کوبی دیوارهای گود^۳

۵) روش دوخت به پشت^۴ یا مهار کششی دیواره های گود^۵

۶) دیوار دیافراگمی^۶

۷) دیوار برلنی^۷

۸) روش سپرکوبی^۸

۹) روش اجرای شمع^۹

۱۰) روش ساخت از بالا به پایین^{۱۰}

۳. پیشینه پژوهش

مجید یزدان دوست (۲۰۱۸) ضریب شبه استاتیکی را به عنوان تابعی از پارامترهای اصلی زلزله، ویژگی های ژئوتکنیکی ساختگاه و سطوح عملکرد دیوار بیان کرده است. در این پژوهش ابتدا با انجام آزمایش های میز لرزان به تعیین مرزهای سطوح عملکرد در شرایط لرزه ای و هندسه مختلف پرداخته شد. سپس با نتایج مدلسازی عددی در قالب تغییر شکل های ماندگار و تعیین ضریب شبه استاتیکی معادل با استفاده از آنالیزهای تعادل حدی پرداخته شد [۳].

دشتارا و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از یک مدل المان محدود سه بعدی به مقایسه نتایج عددی و داده های تجربی حاصل از تست سانتریفیوژ که توسط ویونستک انجام شده بود پرداختند و نشان دادند که مدل المان محدود توسعه یافته می تواند رفتار لرزه ای سیستم میخکوبی شده را به درستی شبیه سازی کند [۴].

مجید یزدان دوست و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثر روش تقویت خاک بر خواص دینامیکی، مقادیر مدول برشی، نسبت میرایی برای دیوارهای نیلینگ شده و دیوارهای مسلح شده با تسمه فولادی با استفاده از تست های میز لرزان پرداختند. نتایج نشان داد که روند تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی در مقابل کرنش برشی به شدت تحت تأثیر روش تقویت و فشار همه جانبه است [۵].

مجید یزدان دوست و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مجموعه ای از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی دیوار خاک مسلح شده با نوار فولادی، دیوار میخکوبی شده و دیوار حائل مرکب و با در نظر گرفتن اثر توزیع غیریکنواخت شتاب در طول ارتفاع دیوار به تعیین ضریب شبه استاتیک در امتداد ارتفاع دیوار پرداختند و در انتها میانگین ضریب شبه استاتیک برای هر سه سازه خاک مسلح به طور جداگانه به عنوان تابعی از مقادیر حداکثر شتاب افقی متناظر با شکست در مکان های مختلف معرفی شد [۶].

¹ Truss Retaining Structures

² Strut

³ Nailing

⁴ Tie back

⁵ Anchorage

⁶ Diaphragm Pile Wall

⁷ Berliner Wall

⁸ Sheet Pile

⁹ pile

¹⁰ Top/Down Construction



ایرج رحمانی و امیر نجاتی (۲۰۱۹) به بررسی رفتار پایداری دیوار میخکوبی شده دائمی تحت بار دینامیکی پرداخته‌اند و با استفاده از ابزارگذاری صورت گرفته در گود هتل نرگس ۲ و مدلسازی این گود با نرم‌افزار فلک به تأیید صحت این نرم‌افزار پرداخته‌اند [۷].

سینگ^۱ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی برخی از شیب‌های معمولی که عموماً در راه‌آهن هند با آن مواجه می‌شوند، به صورت عددی برای تعیین پایداری آن از نظر ضریب ایمنی^۲ تحت شرایط استاتیکی و لرزه‌ای با استفاده از روش تفاضل محدود^۳ و روش تعادل حدی^۴ پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که شیب و طول میخ تأثیر قابل توجهی بر ضریب ایمنی، نیروی محوری میخ و نیروی برشی دارد. همچنین مشخص شد که نتایج هر دو رویکرد قابل مقایسه هستند، اگرچه، ضریب ایمنی به دست آمده از روش تعادل حدی کمی بالاتر از روش تفاضل محدود بود [۸].

فرخزاد و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثرات طول و زاویه میلگردهای نصب شده بر رفتار لرزه‌ای خاک‌های میخکوبی شده پرداخته‌اند. برای این منظور از رکوردهای زلزله طیس و منجیل استفاده شده است. نتایج بررسی نشان داد که طول و زاویه میخ بر پاسخ شتاب و همچنین جابه‌جایی‌های عمودی و افقی در سطح گودبرداری در طول زلزله تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این نشان داده شد که وزن سربار، نوع خاک و شتاب زلزله بر پایداری لرزه‌ای دیوارهای میخکوبی شده و ضریب تشدید تأثیر می‌گذارد [۹].

متو کومار^۵ و همکاران (۲۰۲۲) از روش شبه استاتیک برای تجزیه و تحلیل پایداری دیوار عمودی میخ شده با خاک تحت شرایط لرزه‌ای استفاده کردند. آنها نشان دادند که روش شبه استاتیک یک رابطه خطی با پارامترهای لرزه‌ای نشان می‌دهد و تغییرات نسبت به زمان را نادیده می‌گیرد [۱۰].

بازیار و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر اضافه بار بر روی حرکت دیوارها تحت بار لرزه‌ای با استفاده از تست‌های سانتریفیوژ پرداخته‌اند. مشخص شد که محل اضافه بار روی سطح زمین یک فاکتور مهم و تأثیرگذار بر حرکات ناشی از زلزله است و بدترین حالت قرارگیری بار در پشت دیوار است. همچنین مشاهده توزیع غیریکنواخت شتاب، فرض طراحی شبه استاتیک مبنی بر فرض یک ضریب لرزه ثابت در تمام ارتفاع را زیر سؤال می‌برد [۱۱].

در مطالعه وانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۴)، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سانتریفیوژ برای بررسی تأثیر زاویه انکر بر پاسخ لرزه‌ای سیستم پایداری انکراژ استفاده شد. برای این منظور، اثرات دو زاویه آرایش کابل انکر بر روی پاسخ لرزه‌ای شیب، فشار دینامیکی جانبی زمین، نیروی محوری کابل انکر و گشتاور دینامیکی انکر مقایسه و تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر زاویه چینش کابل انکر می‌تواند میزان آسیب لرزه‌ای به شیب و نشست بالای شیب (تا حداکثر کاهش ۷۷ درصدی) را کاهش دهد. زوایای مختلف کابل‌های انکر، توزیع فشار زمین لرزه‌ای و لنگر خمشی دینامیکی را تغییر نمی‌دهند، اما می‌توانند به طور قابل توجهی بر بزرگی و سرعت رشد آنها تأثیر بگذارند. زاویه چیدمان مناسب کابل انکر می‌تواند به طور موثر رشد نیروی داخلی کابل انکر را کاهش دهد و خطر خرابی کابل انکر را کاهش دهد [۱۲].

وو و همکاران^۷ (۲۰۲۴) در تحقیق خود پاسخ لرزه‌ای شیب‌های تقویت شده با سیستم انکراژ را با در نظر گرفتن اثرات ترکیبی تغییرات فصلی و زلزله بررسی نمودند. این تحقیق با استفاده از یک سری تست میز لرزان و همچنین شبیه سازی عددی انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که پاسخ‌های لرزه‌ای، از جمله پاسخ شتاب و پاسخ جابجایی، در فصل گرم بیشتر از فصل سرد است. برعکس، نیروی محوری انکرها در فصل سرد بیشتر است. در طول فصل گرم، سیستم انکراژ "فیلتر فرکانس

¹ Singh

² Factor Of Safety (FOS)

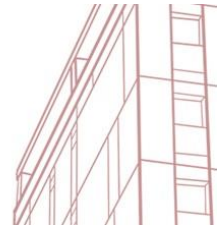
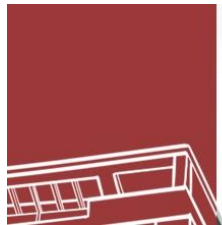
³ Finite Difference Method (FDM)

⁴ Limit Equilibrium Analysis Method (LEM)

⁵ Muthukumar

⁶ Wang et al.

⁷ Wu et al.



بالا و تقویت فرکانس پایین" را نشان می‌دهد، در حالی که ویژگی‌های طیفی در فصل سرد معکوس می‌شوند. بنابراین، در طراحی لرزه‌ای چنین سیستم‌هایی در مناطق یخ زده، در نظر گرفتن تغییر شکل شیب در فصل گرم برای جلوگیری از آسیب ناشی از شتاب یا جابجایی بیش از حد ضروری است. علاوه بر این، نیروهای داخلی سازه انکراژ باید در فصل سرد بررسی شود تا از خرابی‌های مکانیکی ناشی از اثرات ترکیبی زلزله و اثرات یخ زدگی جلوگیری شود [۱۳].

۴. معرفی کلی پروژه مورد بررسی

همانطور که پیش از این بیان شد، مدل مورد بررسی در این تحقیق، سازه نگهدارنده اجرا شده در ساختمان سرپرستی شعب بانک صادرات استان خوزستان که به روش ترکیبی دیوار دیافراگمی و انکراژ اجرا شده است، می‌باشد.

۵. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک محل احداث پروژه

جهت تعیین خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک محل بر روی نمونه‌های اخذ شده با توجه به نوع و عمق نمونه‌ها و همچنین محدوده تأثیر تنش‌های ناشی از بار سازه آزمایش‌های مختلفی در آزمایشگاه به عمل می‌آید. آزمایش‌ها و روش انجام آنها مطابق آیین‌نامه‌های متداول مکانیک خاک (ASTM, AASHTO) زیر نظر متخصصین مکانیک خاک انتخاب و به انجام رسیده است.

۵ عدد گمانه به عمق ۲۰ متر در این محل حفر گردید که مطابق بررسی‌های صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی پروفیل زیر سطحی خاک در محل حفاری شده شامل ۳ لایه به شرح زیر می‌باشد.

- لایه اول

از ابتدای گمانه تا عمق ۰/۸ متری، خاک از نوع خاک هوازده و دستخورده (Disturbed Soil) می‌باشد که بدلیل هوازده بودن و ناشناخته بودن رفتار، این مصالح از محل برداشته شدند.

- لایه دوم

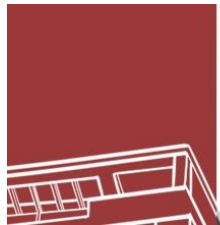
این لایه از عمق ۰/۸ تا ۶ متری در گمانه ۳ و ۴ و از عمق ۰/۸ تا ۲ متری در سایر گمانه‌ها را شامل شده و مرکب از مصالح رسی با خواص پلاستیسیته کم می‌باشد (Low plasticity clay). این لایه در معیار USCS در دسته CL طبقه‌بندی می‌گردد. با استفاده از نتایج آزمایش SPT، این لایه دارای تراکم زیاد تا بسیار زیاد (Stiff to very stiff) قابل ارزیابی می‌باشد. بر طبق بررسی‌های صحرایی، سطح آب زیرزمینی تا عمق ۲۰ متری قابل تشخیص نبود. لازم به ذکر است که تراز آب در ساحل کارون از تراز آب در رودخانه تبعیت می‌کند و لذا بدلیل نزدیکی ساختگاه به کارون، انتظار می‌رود در فصلی که حفاری صورت گرفته است تراز آب تا عمق حفاری در دسترس نباشد. بر مبنای آزمایش انجام شده، مصالح این لایه بیش تحکیم یافته و بسیار سفت و با تراکم پذیری کم می‌باشند. لازم به ذکر است که نشانه مایع و نشانه تراکم، حاکی از آنست که خاک دارای قوام کم و تراکم پذیری بالا می‌باشد. این لایه با دارا بودن رنگی روشن و لجن گونه، مخاطره وجود مواد آلی را گوشزد می‌نماید (در آزمایش تعیین درصد موارد آلی وجود مواد آلی تأیید شد اما مقادیر آن کمتر از مقادیر مشکل زا (کمتر از یک درصد) می‌باشد لذا از این منظر مخاطره‌ای موجود نخواهد بود و رنگ خاکستری ناشی از نمک‌های دریایی قضاوت می‌شود). ضریب قابلیت فشرده‌گی M_v برای این لایه بر اساس ایندکس‌های خمیری، بدون آب بودن و عدد SPT به شرح ذیل پیشنهاد می‌شود.

- برای سطح تنش کمتر از ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع: ۰/۱۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

- برای سطح تنش بیشتر از ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع: ۰/۱۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

- لایه سوم

این لایه از عمق ۶ تا ۲۰ متری در گمانه‌های ۳ و ۴ و ۲ تا ۲۰ متری در سایر گمانه‌ها (انتهای گمانه) منظور می‌شود



و متشکل از سنگ پی از جنس رس سنگ (Clay stone) و در برخی گمانه‌ها Sand stone می‌باشد. مقاومت تک محوری سنگ پی بر اساس آزمایشات انجام شده در ساختمان به طور متوسط معادل ۱۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بر آورد شده است. برای این لایه از ضریب فشردگی ۰/۰۰۵ کیلو گرم بر سانتی متر مربع استفاده شده است. در جدول (۱) خصوصیات ژئوتکنیکی لایه دوم و سوم، آورده شده است.

جدول (۱): خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های دوم و سوم

پارامتر	لایه دوم	لایه سوم
LL (%)	۳۳	۳۵
PI (%)	۱۴	۱۵
W_n (%)	۱۰	۱۶
$(\text{ton/m}^3)\gamma_{\text{wet}}$	۱/۹۳	۲/۱
$(\text{ton/m}^3)\gamma_d$	۱/۷۵	۱/۸
I_c	۱	-
I_L	۰	-
C_u (kg/cm ²)	۱/۲	۰/۶
Φ_u	۵	۱۵
$(\text{kg/cm}^2)C'$	۰/۱	۰/۴
Φ'	۳۰	۲۰
E (kg/cm ²)	۱۲۰	۵۰۰
ν	۰/۴۵	۰/۳

ضریب عکس‌العمل بستر خاک (K_s) در مدل نمودن بستر در روش وینکلر که مبنای محاسبات بسیاری از نرم افزارهای محاسباتی پی می‌باشد، کاربرد دارد. مقادیر این ضریب در عمق‌های مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

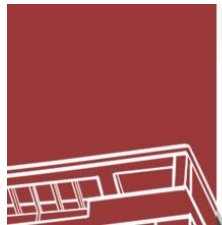
جدول (۲): ضریب عکس‌العمل بستر برای عمق‌های متفاوت پی گسترده

عمق (متر)	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵	۵/۵	۶
K_s (ton/m ³)	۱۰۸۰	۱۱۷۰	۱۲۶۰	۱۳۴۰	۱۴۳۰	۱۵۳۰	۱۶۴۰	۱۷۵۰	۱۹۴۰	۱۹۶۰	۲۲۵۰

با استفاده از نتایج آزمایشات سه محوری و صرف‌نظر از اثر کاهنده کرنش صفحه ای (PS) نسبت به تغییر شکل در دو صفحه، ضرایب رانش افقی خاک که بر ابنیه نگهبان و سازه‌های مجاور و مجاری مدفون وارد می‌شود، به شرح جدول (۳) می‌باشند.

جدول (۳): ضرایب رانش افقی خاک

K_0	K_a	K_p
۰/۵	۰/۳۳	۳/۰۰



۶. معرفی طرح پایدارسازی در پروژه حاضر

با توجه به آنکه اضلاع شمال، شرق، جنوب و بخش جنوبی ضلع غرب در مجاورت خیابان و پارکینگ قرار دارند و با در نظر گرفتن نوع خاک و محدودیت تغییرشکلی دیواره در محل پروژه، از سیستم انکراژ و احداث دیوار دیافراگمی (با ضخامت ۸۰ سانتی متر) به عنوان سیستم پایدارسازی موقت این اضلاع استفاده شده است. در ادامه مبانی محاسباتی و مشخصات هندسی دیوارها و انکرهای بکار رفته در پروژه، بیان شده‌اند.

۷. بارگذاری

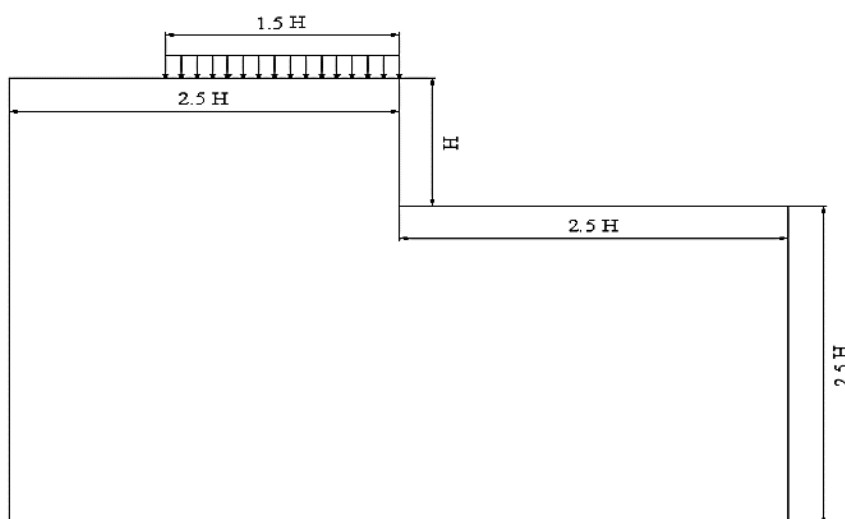
بنابر آیین‌نامه FHWA، بار خیابان برابر ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و بنابر آیین‌نامه بارگذاری مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، بار ساختمان به ازای هر طبقه ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع، شامل ۷ کیلونیوتن بر مترمربع بار مرده و ۳ کیلونیوتن بر مترمربع بار زنده می‌باشد.

۸. مبانی محاسباتی انکرها

برای هر رشته از استرندها، سطح مقطع برابر ۱۴۳ میلیمتر مربع و مدول الاستیسیته برابر ۲۰۰ کیلونیوتن بر میلیمتر مربع می‌باشد.

۹. مشخصات هندسی

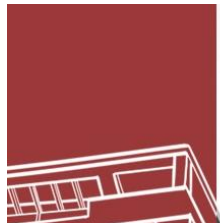
ابعاد مقطع برای مدل کردن در نرم‌افزار، در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل H ، ارتفاع گود است که با توجه به تراز کف گود و تراز زیر پی ساختمان همسایه یا تراز زمین و خیابان بدست می‌آید.



شکل (۱): ابعاد مقطع برای مدل کردن در نرم‌افزار

۱۰. مشخصات انکرها

مشخصات انکرهای استفاده شده در جدول (۴) آورده شده است.



جدول (۴): مشخصات انکرهای مورد استفاده در پروژه حاضر

پارامتر	مقادیر
قطر رشته انکر (cm)	۱۴
اصطکاک سطح رشته انکر (KN)	۲۰۰
زاویه انکر (درجه)	۱۰
ظرفیت رشته‌ها (KN)	۱۵۰
مدول الاستیسیته (kpa)	2×10^8
سطح مقطع (mm^2)	۱۴۳
مقاومت شکست (KN)	۲۶۰
طول انکر (m)	۱۰ متر
فاصله انکرها (m)	۱ متر

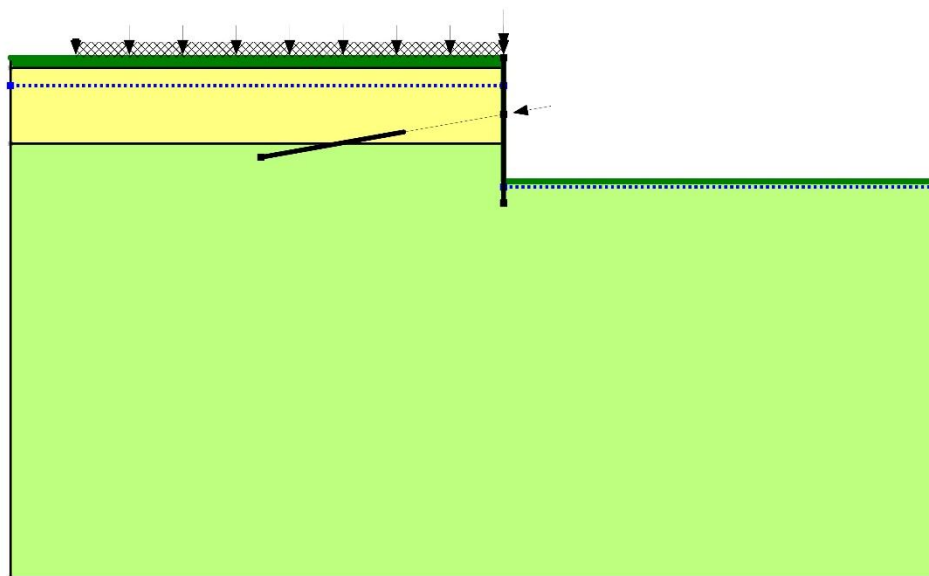
در جدول (۵) مشخصات مدل‌های مختلف آورده شده است.

جدول (۵): مشخصات هندسی مدل‌های مورد بررسی

شماره مدل	روش پایداری‌سازی
۱	بدون پایداری‌سازی
۲	دیوار دیافراگمی
۳	انکراژ
۴	دیوار + انکراژ

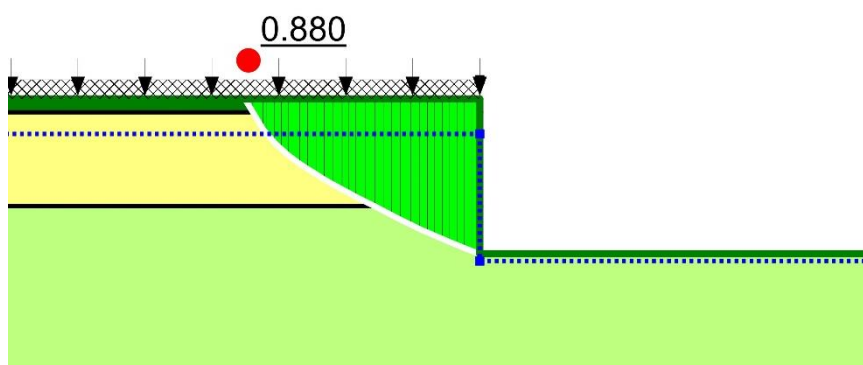
۱۱. نتایج ضریب اطمینان پایداری شیب مدل‌ها

در این بخش به ارائه ضریب اطمینان پایداری شیب در مدل‌های مورد بررسی پرداخته شده است. در شکل (۲) نمایی از مدل ترسیم شده در نرم‌افزار ژئواستودیو، قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که این مدل مربوط به سیستم پایداری شیب واقعی اجرا شده در ساختمان مرکزی بانک صادرات اهواز بوده که از هر دو روش دیوار دیافراگمی و انکر در آن استفاده شده است.



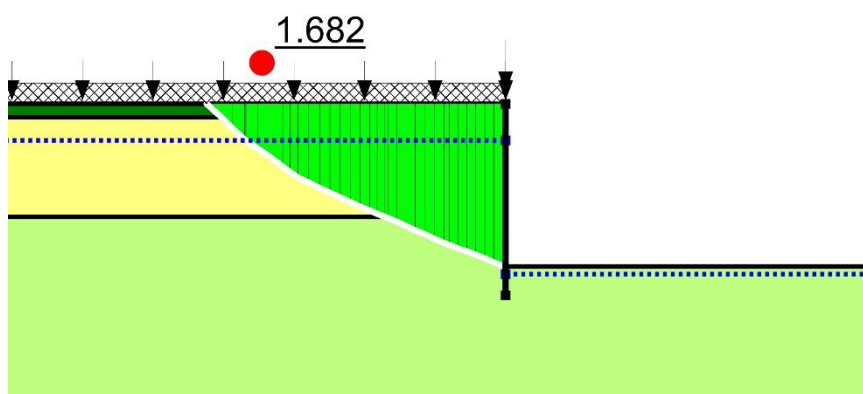
شکل (۲): مدل دیوار و انکر در نرم افزار ژئواستودیو

در شکل (۳) تصویری از تحلیل پایداری گود مقطع مورد بررسی بدون استفاده از دیوار و انکر، آورده شده است. مقدار ضریب اطمینان در این حالت برابر 0.88 بوده که مناسب نمی باشد و نشانگر این مطلب است که این گودبرداری نیازمند استفاده از یک سیستم پایداری گود می باشد.



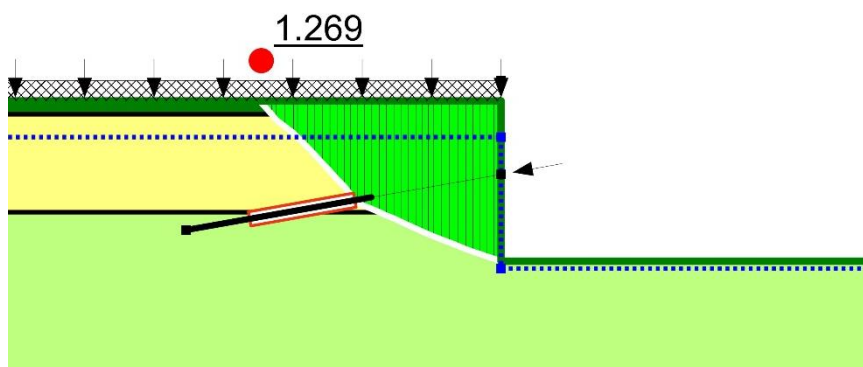
شکل (۳): ضریب اطمینان پایداری شیب مدل شماره ۱ (بدون دیوار و انکر)

در شکل های (۴) تصویری از تحلیل پایداری گود با استفاده از دیوار دیافراگمی با ضخامت 80 سانتی متر، آورده شده است. همانطور که در این شکل می توان دید، مقدار ضریب اطمینان پایداری گود با استفاده از دیوار دیافراگمی و بدون انکر، مناسب می باشد. این بررسی نشان می دهد که از نظر پایداری گودبرداری و لغزش، استفاده از دیوار دیافراگمی بدون انکر نیز کفایت می کند.



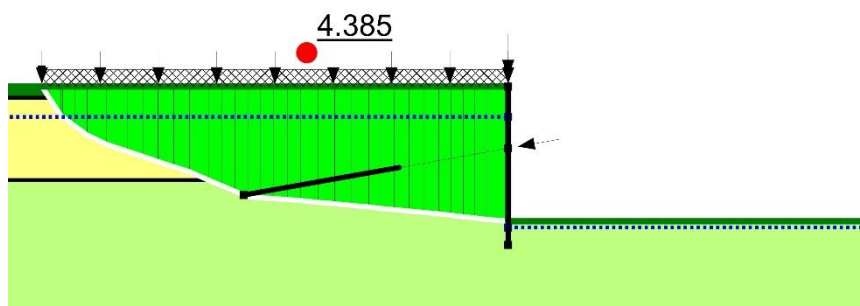
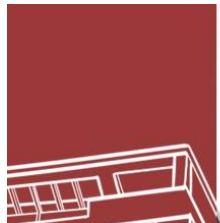
شکل (۴): ضریب اطمینان پایداری شیب مدل شماره ۲

در شکل (۵) به بررسی ضریب اطمینان پایداری گود در حالت استفاده از انکر بدون دیوار دیافراگمی پرداخته شده است. با دقت در این شکل می توان دید که در حالت استفاده از انکر به تنهایی، ضریب اطمینان پایداری گود چندان مناسب نبوده و از حالت دیوار دیافراگمی تنها، کمتر می باشد.



شکل (۵): ضریب اطمینان پایداری شیب مدل شماره ۳

در شکل (۶) به بررسی حالت استفاده از ترکیب دیوار و انکر، پرداخته شده است. با دقت در این شکل می توان دید که در این حالت، با ترکیب این دو سیستم، به مقدار ضریب اطمینان پایداری لغزشی گود، افزوده شده و پایداری لغزشی گود تا حد بسیار زیادی بهبود پیدا کرده است.



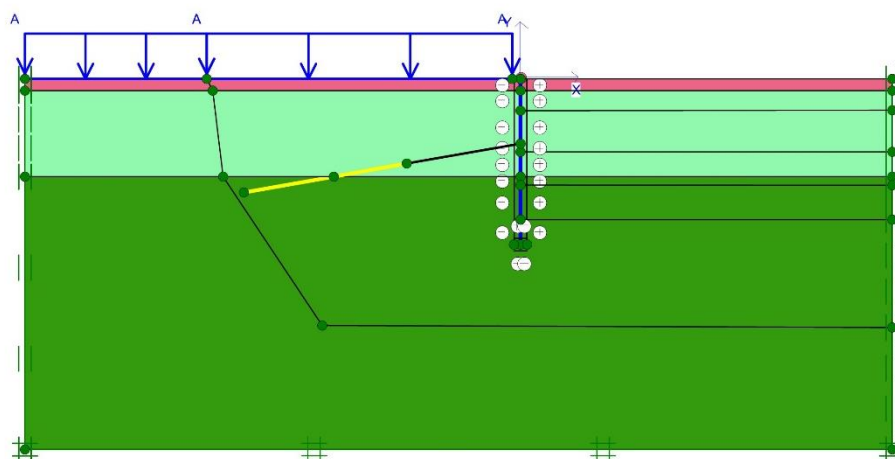
شکل (۶): ضریب اطمینان پایداری شیب مدل شماره ۴

جدول (۶): ضریب اطمینان پایداری شیب مدل‌های مورد بررسی

شماره مدل	روش پایداری‌سازی	ضریب اطمینان
۱	بدون پایداری‌سازی	0.880
۲	دیوار دیافراگمی	1.682
۳	انکراژ	1.269
۴	دیوار + انکراژ	4.385

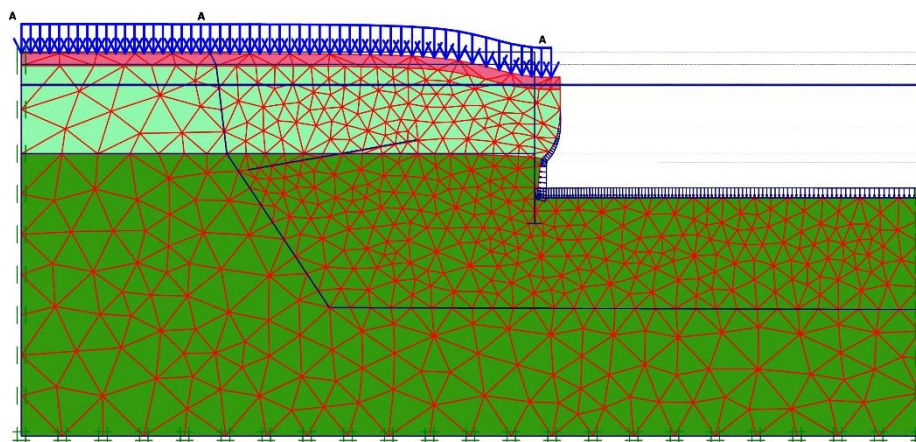
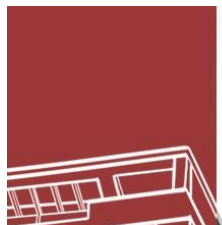
۱۲. نتایج جابجایی‌های ایجاد شده در مدل‌ها

در این بخش به بررسی مقادیر تغییر مکان‌های افقی و قائم ایجاد شده در مدل‌ها، با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس پرداخته شده است. در شکل (۷) نمایی از مدل ترسیم شده در نرم‌افزار پلکسیس آورده شده است. لازم به ذکر است که این مدل مربوط به سیستم ترکیبی دیوار دیافراگمی و انکر اجرا شده در گودبرداری ساختمان مرکزی بانک صادرات اهواز می‌باشد.



شکل (۷): مدل دیوار و انکر در نرم‌افزار پلکسیس

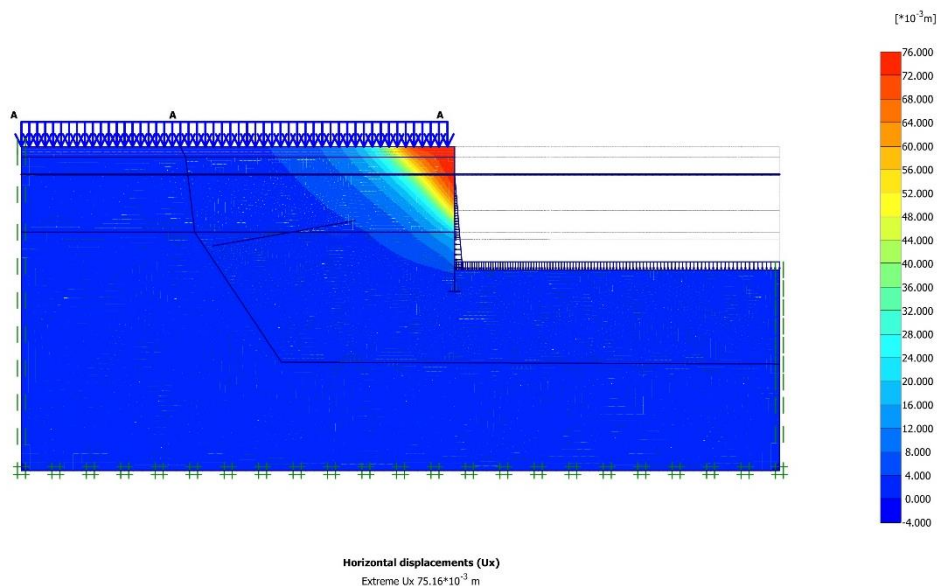
در شکل (۸) تصویری از تغییر شکل کلی مدل بدون دیوار و انکر، آورده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که در این مدل، فروریزش گود رخ داده و لزوم استفاده از یک سیستم پایداری گود، اثبات می‌شود.



Deformed mesh
Extreme total displacement 104.24×10^{-3} m
(displacements scaled up 20.00 times)

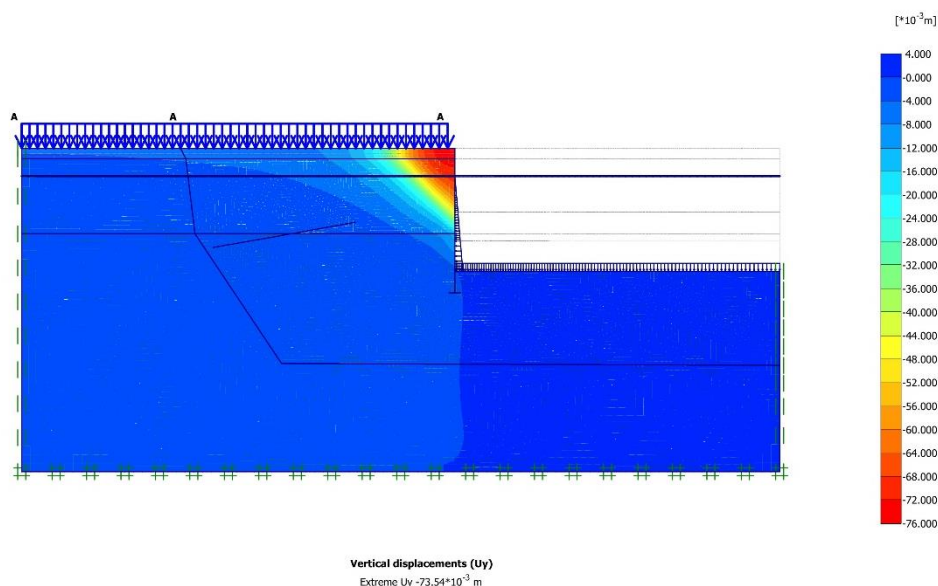
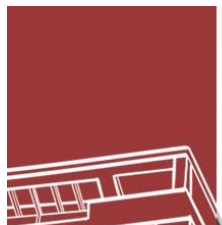
شکل (۸): تغییر مکان کلی مدل شماره ۱

در شکل‌های (۹) و (۱۰) مقادیر تغییر مکان افقی و قائم در مدل بدون سیستم پایداری، آورده شده است. کاملاً بدیهی است که مقادیر جابجایی‌ها در این مدل، نسبت به مدل‌های دارای سیستم پایداری بیشتر می‌باشد. ضمن اینکه با توجه به فروریزش خاک در این مدل، مقادیر جابجایی اهمیت چندانی ندارند.



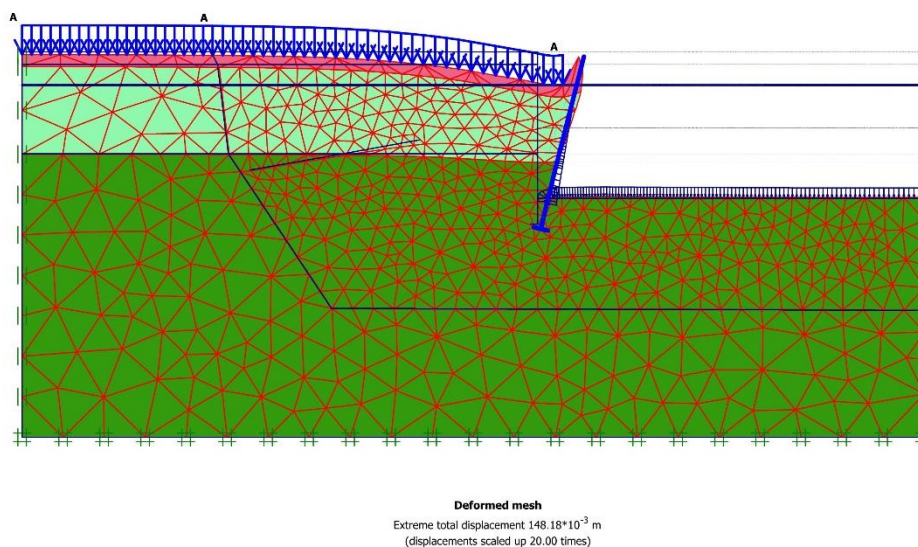
Horizontal displacements (Ux)
Extreme Ux 75.16×10^{-3} m

شکل (۹): تغییر مکان افقی مدل شماره ۱

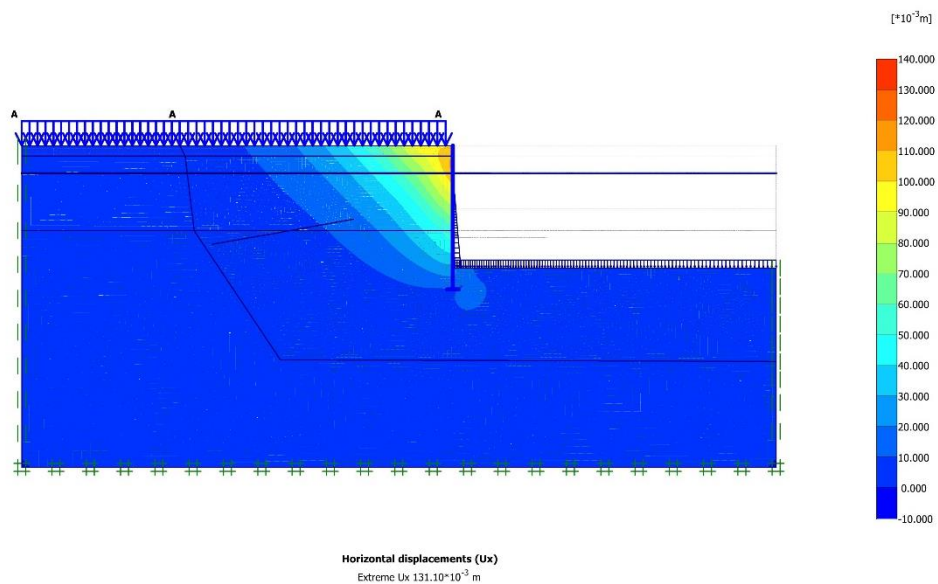


شکل (۱۰): تغییر مکان قائم مدل شماره ۱

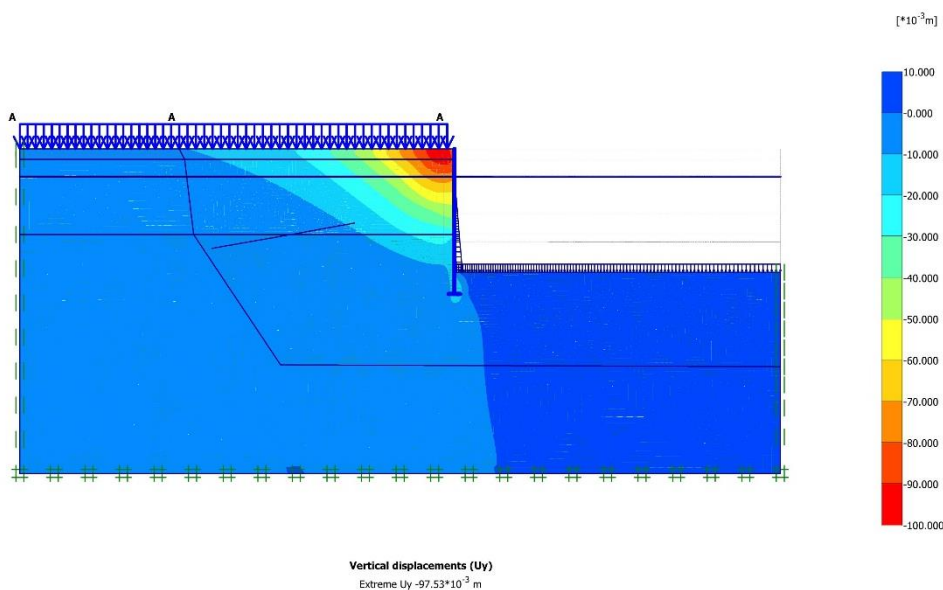
در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) مقادیر تغییر مکان کلی، افقی و قائم در مدل شماره ۲ که دارای سیستم دیوار دیافراگمی با ضخامت ۸۰ سانتی‌متر و بدون انکر می‌باشد، آورده شده است. نتایج تحلیل بیانگر این است که در این مدل، فروریزش گود اتفاق نمی‌افتد و این روش به تنهایی و بدون استفاده از انکر نیز جوابگو می‌باشد.



شکل (۱۱): تغییر مکان کلی مدل شماره ۲

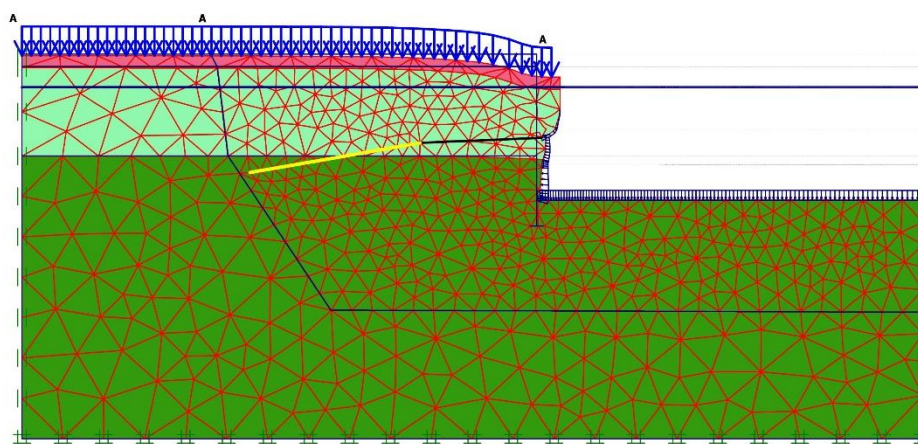
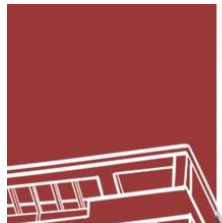


شکل (۱۲): تغییر مکان افقی مدل شماره ۲



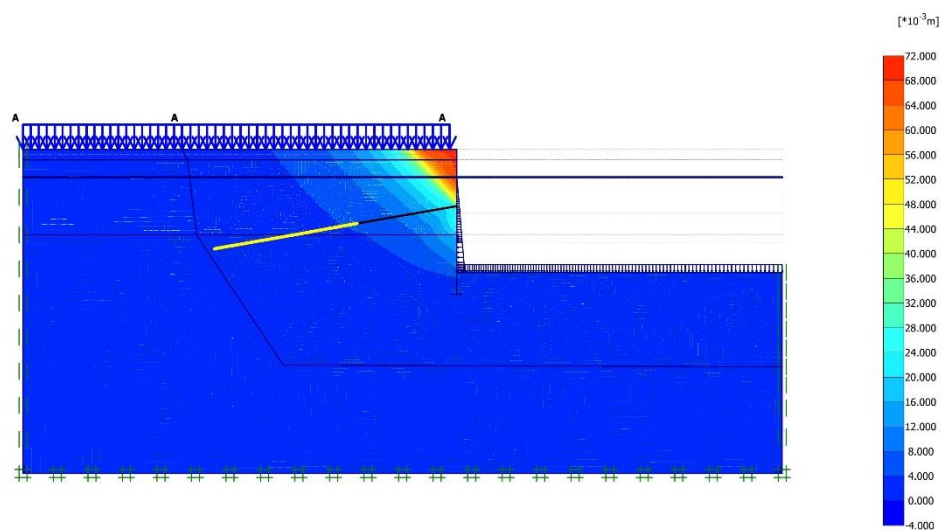
شکل (۱۳): تغییر مکان قائم مدل شماره ۲

در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) مقادیر تغییر مکان کلی، افقی و قائم در مدل شماره ۳ که دارای سیستم انکر با فواصل انکر ۱ متری می‌باشند، آورده شده است. نتایج تحلیل بیانگر این است که در این مدل، فروریزش گود اتفاق خواهد افتاد.



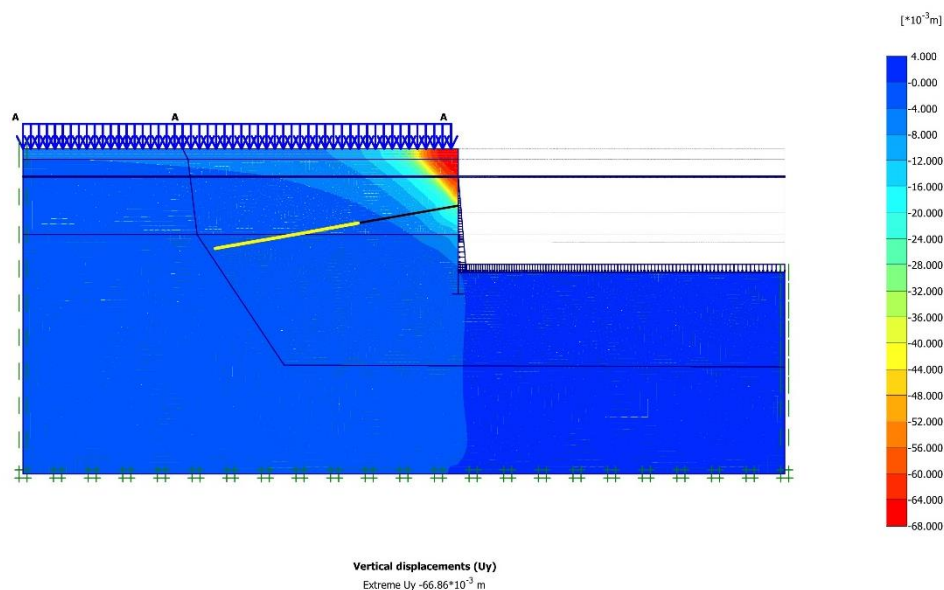
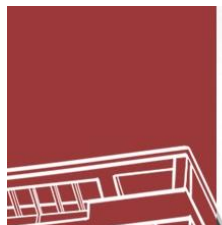
Deformed mesh
Extreme total displacement 95.61×10^{-3} m
(displacements scaled up 20.00 times)

شکل (۱۴): تغییر مکان کلی مدل شماره ۳



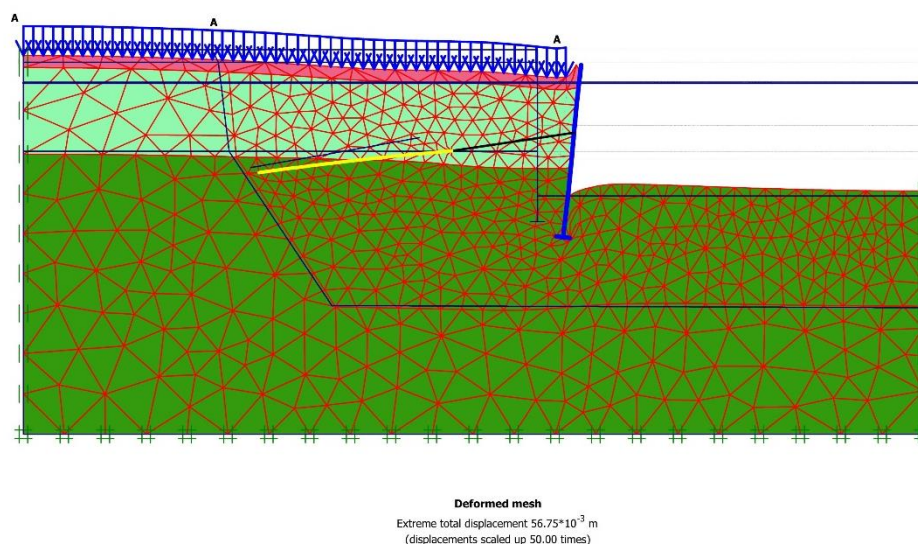
Horizontal displacements (Ux)
Extreme Ux 69.08×10^{-3} m

شکل (۱۵): تغییر مکان افقی مدل شماره ۳

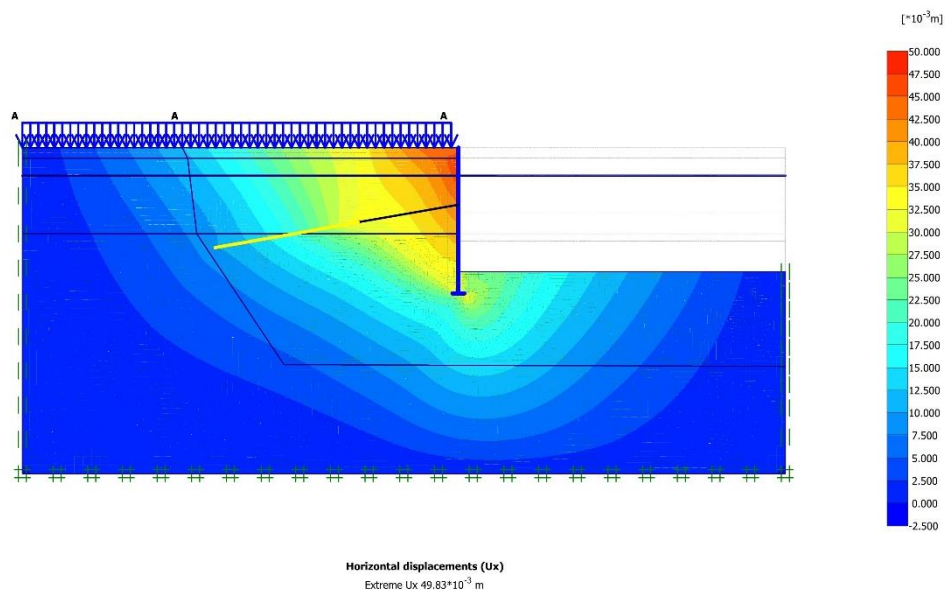


شکل (۱۶): تغییر مکان قائم مدل شماره ۳

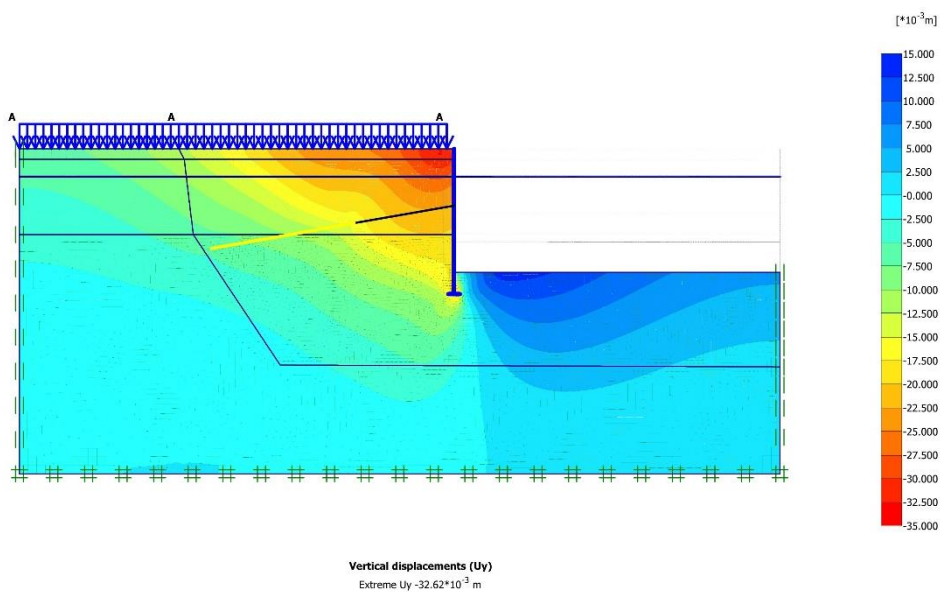
در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) مقادیر تغییر مکان کلی، افقی و قائم در مدل شماره ۴ که دارای سیستم ترکیبی دیوار دیافراگمی ۸۰ سانتی متری و انکر با فواصل انکر برابر ۱ متری می‌باشد، آورده شده است. نتایج تحلیل بیانگر این است که استفاده از سیستم ترکیبی دیوار دیافراگمی و انکراژ، مقادیر جابجایی را تا میزان زیادی کاهش داده و از فروریزش گود جلوگیری می‌کند.



شکل (۱۷): تغییر مکان کلی مدل شماره ۴



شکل (۱۸): تغییر مکان افقی مدل شماره ۴



شکل (۱۹): تغییر مکان قائم مدل شماره ۴



جدول (۷): جابجایی های ایجاد شده در مدل های مورد بررسی

شماره مدل	روش پایداری سازی	تغییر مکان افقی (میلیمتر)	تغییر مکان قائم (میلیمتر)	فروریزش گود (Yes/No)
۱	بدون پایداری سازی	75.16	73.54	Yes
۲	دیوار دیافراگمی	131.10	97.53	No
۳	انکراژ	69.08	66.86	Yes
۴	دیوار + انکراژ	49.83	32.62	No

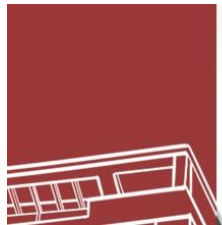
۱۳. جمع بندی نتایج

نتایج بدست آمده از تحلیل ها و خروجی های ارائه شده، به شرح زیر می باشد:

- ۱- مقدار ضریب اطمینان پایداری گود با استفاده از دیوار دیافراگمی و بدون انکر، مناسب می باشد. این بررسی نشان می دهد که از نظر پایداری گودبرداری و لغزش، استفاده از دیوار دیافراگمی بدون انکر نیز کفایت می کند.
- ۲- استفاده از انکر به تنهایی، ضریب اطمینان مناسبی را جهت پایداری لغزش گود، بدست نمی دهد.
- ۳- در حالت استفاده همزمان از دیوار دیافراگمی و انکر، مقادیر ضریب اطمینان بسیار مناسب می باشد.
- ۴- در مدل بدون دیوار و انکر، فروریزش گود رخ داده و لزوم استفاده از یک سیستم پایداری سازی گود، اثبات می شود.
- ۵- در مدل با سیستم دیوار دیافراگمی به ضخامت ۸۰ سانتی متر، فروریزش گود اتفاق نمی افتد و این روش به تنهایی و بدون استفاده از انکر نیز جوابگو می باشد.

۱۴. مراجع

- [1] Komak Panah, A. and Yazdandoust, M., 2013. Determining the quasi-static coefficient of soilnailed walls in the alluvium of Tehran based on seismic performance levels. Civil Engineering Journal, 29(1), pp. 3-13. [In Persian].
- [2] Ghareh, S. (2015). "Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils", Measurement, 73, 341-351.
- [3] Yazdandoust, M., 2018. Numerical and Experimental Study on Seismic Behavior of SoilNailed Walls to Introduce the Pseudo Static Coefficient Based on Performance Levels. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(1), pp. 189-210. [In Persian]. doi: 10.22060/ceej.2017.11737.5068.
- [4] Dashtara, H., Kolahdouzan, A., Saeedi-Azizkandi, A. and Baziar, M. Numerical Investigation on the Displacements and Failure Mechanism of SoilNailed Structures in Seismic Conditions. GeoCongress 2019: Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2019. American Society of Civil Engineers Reston, VA, 160-168.
- [5] Yazdandoust, M. and Ghalandarzadeh, A., 2019. Pseudo-static coefficient in reinforced soil structures. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 20(6), pp. 320-337. doi: 10.1680/jphmg.18.00013.
- [6] Yazdandoust, M., Komak Panah, A. and Ghalandarzadeh, A., 2019. Effect of reinforcing technique on strain-dependent dynamic properties of reinforced earth walls. Soils and Foundations, 59(4), pp. 1001-1012. doi: 10.1016/j.sandf.2019.04.005.



- [7] Rahmani, I. and Nejati, A., 2019. Determining the performance of dynamic behavior of soil-nailed walls under seismic loading based on displacement. *Earthquake Science and Engineering Quarterly*, 6(4), pp. 11-21. [In Persian].
- [8] Singh, S. K., Negi, M. S. and Singh, J., 2021. Strengthening of Slope by Soil Nailing Using Finite Difference and Limit Equilibrium Methods. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(3), pp. 13. doi: 10.1007/s40891-021-00308-4.
- [9] Farrokhzad, F., Motaharitabari, S., Abdolghafoorkashani, H. and Tavakoli, H., 2021. Seismic Behaviour of Excavations Reinforced with Soil-Nailing Method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(6), pp. 4071-4091. doi: 10.1007/s10706-020-01625-7.
- [10] Muthukumar, S., Kolathayar, S., Valli, A. and Sathyan, D., 2022. Pseudostatic analysis of soil nailed vertical wall for composite failure. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(2), pp. 561-573. doi: 10.1080/17486025.2020.1827163.
- [11] Baziari, M. H., Ghadamgahi, A. and Brennan, A. J., 2022. Centrifuge study of seismic response of soilnailed walls supporting a footing on the ground surface. *Géotechnique*, pp. 1-17. doi: 10.1680/jgeot.21.00157.
- [12] Wang, Y., Zheng, T., Sun, R., Sun, Z., Xie, Z., Shan, Z., Liu, H., Qi, W., Bai, Y., 2024. Influence of the anchor angle on the seismic response of anchored stabilizing piles: Centrifuge modeling tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 180, 108575.
- [13] Wu, X., Dong, J., He, P., Lian, B., Xie, Y., 2024. Seismic response of the anchored frame beam reinforced slopes in seasonally frozen regions: Shaking table test and numerical analysis, *Cold Regions Science and Technology*, 221, 104181.