

تحلیل دینامیکی دیوار دیافراگمی مهار بندی شده

کاظم برخوردار^{۱*}، محبوبه جواهری^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

(دریافت: تیر ۱۳۹۵، پذیرش: آذر ۱۳۹۵)

چکیده

به منظور پایداری سازی گود و جلوگیری از ریزش ترانشه و تبعات احتمالی ناشی از آن، سازه نگهدارنده مناسب با کاربری موقت یا دائم طراحی می‌گردد. در این مقاله یکی از روش‌های پایداری سازی گودبرداری‌های عمیق، دیوار دیافراگمی مورد بررسی قرار گرفته است. دیوار دیافراگمی هم به صورت طره‌ای و هم همراه با مهار روش موثری برای مقابله با نیروهای استاتیکی و دینامیکی و تامین پایداری گودهای عمیق می‌باشد. در این مقاله دیوار دیافراگمی دارای یک ردیف مهار و با در نظر گرفتن نیروی زلزله مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از برنامه اجزاء محدود PLAXIS بیشینه جابجایی‌های دیوار و تغییر شکل آن، همچنین بیشینه لنگر خمشی دیوار دیافراگمی محاسبه شده است. پشت دیوار در سمت توده خاک و پایین مدل از مرزهای جاذب برای جلوگیری از انعکاس امواج زلزله استفاده شده است. برای اعمال نیروی دینامیکی شتاب نگاشت‌های زلزله طبرستان، بم و رودبار مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق مشخص شد که تغییر شکل و کرنش در زلزله تحت تاثیر مشخصات زلزله است. بیشینه جابجایی جانبی دینامیکی دیوار در قسمت بالای دیوار بوده است. با افزایش سختی مهار بیشینه جابجایی جانبی بالای دیوار کاهش می‌یابد. بررسی مطالعات پارامتریک نشان داد که با افزایش ۱/۵، ۳ و ۴ برابر مدول الاستیسیته خاک میزان کاهش تغییرات بیشینه جابجایی افقی در بالای دیوار هم به ترتیب حدود ۲۵، ۵۳ و ۷۶ درصد کاهش داشته است. همچنین افزایش ۲، ۳ و ۴ برابر چسبندگی خاک به ترتیب کاهش حدود ۷، ۱۱ و ۲۰ درصدی لنگر خمشی دیوار را به دنبال داشته است. در مقایسه مقادیر دینامیکی نسبت به استاتیکی میزان جابجایی بیش از دو برابر و میزان لنگر خمشی هم حدوداً ۱/۳ برابر شده است. بنابراین در طراحی دیوار دیافراگمی در مناطق زلزله خیز حالت بارگذاری زلزله می‌تواند تعیین کننده باشد.

کلید واژه‌ها

گودبرداری عمیق، دیوار دیافراگمی، تحلیل عددی، نیروی دینامیکی زلزله

*عهده دار مکاتبات: kbarkhordari@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌ها علاوه بر اینکه تابع بارهای استاتیکی هستند تحت تاثیر بارهای دینامیکی نیز می‌باشند. اگر این بارها همانند زلزله در مقایسه با بارهای استاتیکی قابل توجه باشند باید در تحلیل و طراحی سازه‌ها مد نظر قرار گیرند. اثرات ارتعاشات وقتی که فرکانس بار دینامیکی برابر و یا بزرگتر از فرکانس طبیعی محیط باشد، باید با آنالیز دینامیکی محاسبه شوند [۱].

شناخت رفتار دیوارها در مجاورت محیط‌های دیگر از جمله محیط‌های خاکی به لحاظ طراحی بهینه و اقتصادی دیوارها حائز اهمیت است و از نظر ژئوتکنیکی، مقدار و نحوه توزیع فشارهای جانبی خاک که بر دیوار وارد می‌شوند، در شرایط گوناگون مثل زلزله، باید کاملاً شناسایی شوند. پایداری لرزه‌ای سازه‌های نگهبان معمولاً به وسیله روش‌های شبه استاتیکی که در آنها اثرات نیروهای زلزله با شتاب‌های افقی و عمودی ثابت حاصل از اینرسی بیان شده‌اند، تحلیل می‌شوند. اثرات زلزله روی دیوارهای نگهبان صلب به صورت تئوریک و تجربی مطالعه شده است. مونونوبه و اوکابه^۱ یک فرمولاسیون ساده شده برای ارزیابی فشار جانبی یک خاکریز با خاک غیر چسبنده خشک بر سازه نگهبان حین زلزله پیشنهاد دادند [۲، ۳].

پاراکاش و باساوانا^۲ و سید و وایتمن^۳ روش مونونوبه-اوکابه را اصلاح کردند و فشار جانبی زلزله را به صورت واقع‌گرایانه تری بررسی کردند. همچنین در مطالعات اخیر، چند محقق دیگر روش شبه استاتیک را برای محاسبه فشار محرک زلزله پشت یک سازه نگهبان مورد توجه قرار دادند. کومار^۴ ضرایب فشار مقاوم زلزله را برای ماسه با استفاده از روش تعادل حدی تعیین کرد. دوایکار و هالکود^۵ یک تحلیل عددی شبه استاتیکی با استفاده از معادلات کوثر فشار محرک و مقاوم زلزله به سازه نگهبان پیشنهاد کرد. کومار و چیتیکلا^۶ ضرایب فشار مقاوم خاک را با استفاده از روش تفسیری، به دست آوردند. مدهاو و کامسواراو^۷، چودهاری و نیمبالکار^۸، چودهاری، سوباراو و چودهاری^۹، تعادل حدی را برای تعیین اختصاصی ضرایب مقاوم زلزله مطابق با واحد وزن، سربار و مؤلفه‌های چسبندگی به کار گرفتند [۴].

چودهاری و سینگ ضرایب فشار محرک تحت شرایط استاتیکی و لرزه‌ای را با استفاده از روش اصلاح شده کولمان تعیین کردند [۴].

اگرچه تمام روش‌های بالا براساس روش تحلیل شبه استاتیک پایه گذاری شدند، اما در آنها اثر مدت زمان اعمال بار زلزله و اثر برش و عبور امواج اولیه از میان محیط خاکی در نظر گرفته نمی‌شود. برای غلبه بر این مشکلات، روش‌های تحلیلی بر پایه رویکرد شبه دینامیکی، توسط استیدمن و زنگ ارائه شد، استیدمن و زنگ نتایج تئوریکی را با آزمایش مدل سانتریفیوژ برای تأیید روش شبه دینامیک مقایسه کردند [۵]. این روش به وسیله چودهاری و نیمبالکار اصلاح شد و هم اکنون برای تحلیل محاسبات فشار مقاوم و محرک زلزله استفاده می‌شود [۶، ۷].

پایداری لرزه‌ای سازه‌های نگهبان معمولاً بوسیله روش‌های شبه استاتیکی که در آنها اثرات نیروهای زلزله با شتاب‌های افقی و عمودی ثابت حاصل از اینرسی، بیان شده‌اند، تحلیل می‌شوند [۸]. در دیوارهای صلب، مسأله اندرکنش خاک سازه نسبتاً ساده است، اما با افزایش انعطاف‌پذیری دیوار به خاطر تغییر شکل غیر یکنواخت و غیر خطی دیوار و تغییر شکل‌های محیط خاکی مجاور دیوار و به عبارتی اندرکنش خاک-دیوار، الگوی توزیع فشار جانبی خاک پیچیده‌تر می‌گردد که طبیعتاً پیش‌بینی نیروهای وارده به دیوار و برقراری تعادل در سیستم و در نتیجه تخمین ارتفاع پایداری دیوار، لنگر حداکثر و جابجایی دیوار را مشکل می‌سازد. تحلیل دیوارهای انعطاف‌پذیر بطور قابل ملاحظه‌ای پیچیده‌تر از دیوارهای وزنی و صلب هستند. این افزایش پیچیدگی ناشی از چندین عامل می‌باشد، مانند گوناگونی این نوع دیوارها (دیوارهای شیت پایل فلزی، دیوارهای شمع‌های حفاری شده با یا بدون مهار، دیوارهای دیافراگمی با استرات در یک یا چند لایه خاک)، این حقیقت که به سبب شکل روش ساخت آنها معمولاً در لایه‌های طبیعی خاک (بیشتر در خاکریز با مصالح دانه‌ای متراکم) باقی می‌مانند. اما به صورت مهم تری نقش ضروری در پایداری بوسیله اندرکنش دینامیکی خاک سازه ایفا می‌شود [۶، ۹].

پیچیدگی اندرکنش خاک-سازه، علاوه بر انعطاف‌پذیری دیوار، به ساختار خاک، تعداد ردیف‌های مهار و نوع سیستم نگه دارنده نیز بستگی دارد. با پیشرفت محاسبات عددی نظیر روش‌های تفاضلات محدود و یا اجزاء محدود، تحلیل‌های

یکی از روش‌های پایدارسازی گودبرداری‌های عمیق دیوار دیافراگمی است که به کمک آن حفاظت خاک پشت دیوار تامین می‌شود. روش ساخت دیوارهای دیافراگمی در اوایل دهه ۱۹۵۰ در کشور ایتالیا ابداع شد. دیوار دیافراگمی را می‌توان نتیجه منطقی تحول جدارهای متشکل از شمع‌های متصل به هم و یا متقاطع دانست که از سال ۱۹۲۱ در کارگاه‌های مختلف ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گرفت. برای اولین بار، ابداع دیوار دیافراگمی به وسیله پروفیسور ودر در سال ۱۹۲۹ و مارکونی در سال ۱۹۲۱ در ایتالیا به ثبت رسید [۱۱].

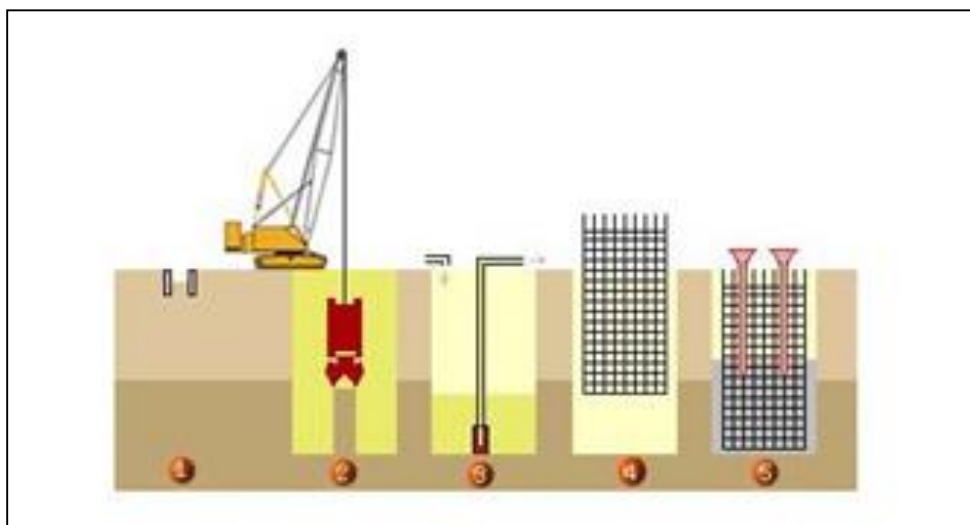
دیوارهای دیافراگمی یا دوغابی، دیوارهای بتنی مسلح یا غیرمسلح ساخته شده در زیر تراز سطح زمین هستند که به منظور نگهداری از دیواره گودها یا آب‌بندی پی سدها و مواردی که اجرای دیوارهای طولی کم عرض و عمیق در زیر سطح خاک مورد نیاز باشد، اجرا می‌شوند. دیوار دیافراگمی پیوسته دارای ترانشه‌های باریک در کنار هم بوده که باید بتن‌ریزی شوند. محیط اطراف ترانشه گود برای جلوگیری از ریزش سنگ و خاک در ابتدای کار توسط ماده دوغابی که پایه‌اش از بنتونیت یا پلیمر بوده پر می‌شود. برای احداث این دیوارها عموماً از دستگاه هیدروفرز یا دستگاه گرب که از مهم‌ترین دستگاه‌های حفاری در ساخت دیوارهای دیافراگمی هستند، استفاده می‌شود [۱۲]. اجرای دیوار دیافراگمی به صورت مرحله‌ای به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شد است.

عدد جاییگزین مناسبی برای تحلیل‌های کلاسیک به شمار می‌آیند. با افزایش قابلیت‌های این روش‌ها برای مدلسازی اجزاء و محیط‌های مختلف، امکان در نظر گرفتن اندرکنش محیط‌های مختلف بر یکدیگر وجود دارد و در نتیجه نتایج مطمئن‌تری نسبت به روش‌های کلاسیک انتظار می‌رود. روش آنالیز اجزای محدود قادر است تا مقادیر فشار جانبی خاک را به ازای مدهای مختلف حرکت دیوار و بارهای سیکلی بررسی نماید.

زمانی که از اجزای محدود برای تحلیل اندرکنش خاک و سازه از جمله مسائل فشار جانبی خاک، استفاده می‌شود، یکی از مهم‌ترین مزایای این روش آنست که اندرکنش بین خاک و سازه به صورت درست مدلسازی می‌شود، با استفاده از روش اجزای محدود، می‌توان تأثیر انعطاف پذیری دیوار و شرایط مرزی دیگر را به میزان و نحوه توزیع فشار جانبی خاک در حین زلزله، بر روی دیوار بررسی نمود.

نرم‌افزار المان محدود PLAXIS در تحلیل دینامیکی و پایداری گودبرداری‌های عمیق و سازه‌های حائل خاک کاربرد وسیعی دارد. در این مقاله نحوه مدلسازی و اعمال نیروی دینامیکی و نتایج به دست آمده از تحلیل دیوار دیافراگمی با مهار پیش‌تنیده مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰].

۲- معرفی دیوار دیافراگمی



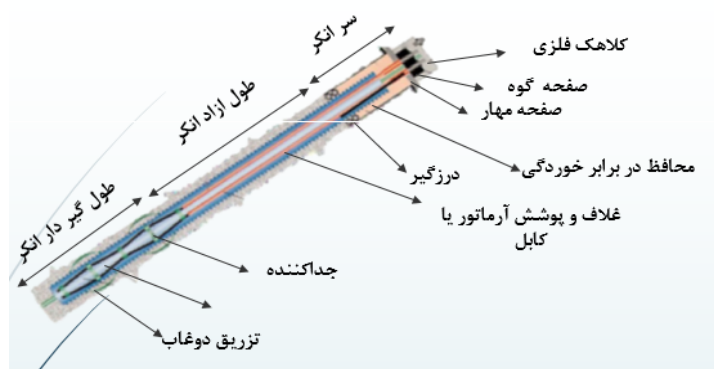
شکل ۱: مراحل اجرای دیوار دیافراگمی ۱- اجرای دیوار راهنما، ۲- گودبرداری تا عمق مورد نظر، ۳- سیرکوله نمودن بنتونیت، ۴- نصب قفسه آرماتور بندی شده، ۵- بتن‌ریزی [۱۳]

۳- معرفی مهار

آنها مهارهای تزریق شده نیز گفته می‌شود. از طرف دیگر به دلیل مکانیزم عملکرد، به سیستم انکراژ دوخت به پشت نیز گفته می‌شود.

اساسی‌ترین مولفه‌های یک سیستم انکراژ عبارتند از: سر انکر، تاندون شامل طول آزاد (غیر پیوندی) و طول محصور (طول پیوندی یا چسبنده) و صفحه باربری است. این بخش‌ها به همراه سایر اجزای آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

مهارها (انکرها) المان‌های سازه‌ای پیش‌تنیده‌ای هستند که در خاک یا سنگ نصب شده و نیروی کششی ایجاد شده در خود را به زمین منتقل می‌کنند. درون چاله مهارها به وسیله ملات گروت تزریق و پر می‌شود که از این لحاظ به



شکل ۲: مهار و اجزای آن [۱۴]

توسط موسسه FHWA انجام شده است [۱۵]. مدلسازی شامل ایجاد هندسه مدل، تعیین پارامترهای مصالح، اعمال شرایط مرزی و اولیه، بارگذاری استاتیکی (با در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ای)، بارگذاری دینامیکی (اعمال شتاب نگاشت) و تحلیل حساسیت روی پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل‌ها و نیروهای دیوار بوده است. تحلیل حساسیت برای مقادیر ارتفاع دیوار، ضخامت دیوار و پارامترهای موثر خاک و تعداد ردیف‌های مهار بوده است. مدلسازی مورد نظر در شکل ۳ به طور شماتیک مشخص شده است.

۴-۲- پارامترهای مدل

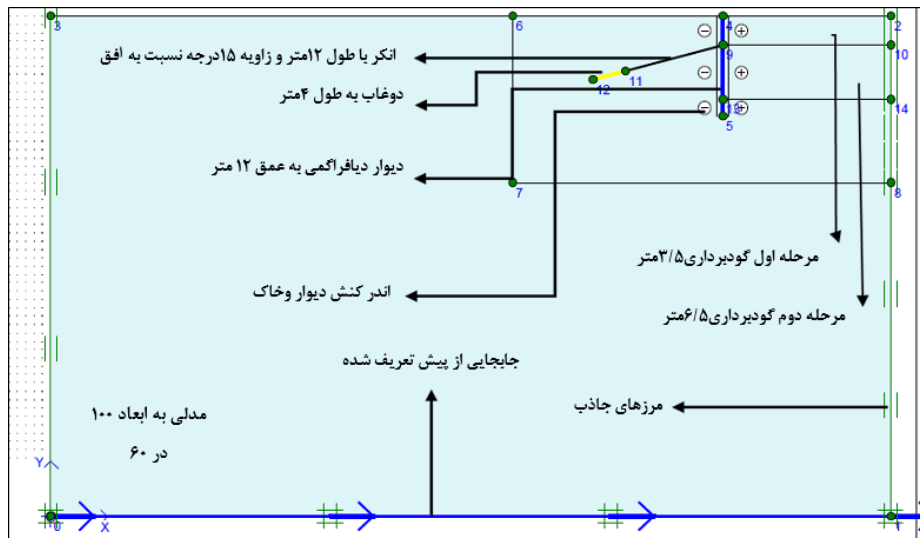
مدل رفتاری خاک الگوی الاستیک-پلاستیک موهر کلمب در نظر گرفته شده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد نظر در جدول ۱ مشخص است. برای اندرکنش بین خاک و سازه نگهبان، المان‌های فصل مشترک (Interface) لحاظ شده است [۱۵].

مهارهای معمولاً با زاویه تمایل ۱۵ تا ۳۰ درجه زیر سطح افق نصب می‌شوند. بدون توجه به زاویه تمایل مهار، ناحیه‌ای که مهار باید در آن قسمت فرو رود، باید آنقدر ادامه پیدا کند تا از سطح پتانسیل لغزش عبور کرده و نیروها را به پشت آن بدوزد. تزریق به مهار نصب شده در زوایای کمتر از ده درجه رایج نیست، مگر تزریق دوغاب با تکنیک مخصوصی صورت گیرد [۱۴]. ترکیب دیوار دیافراگمی و مهار پیش‌تنیده، سیستمی بسیار مناسب برای پایداری سازه نگهبان و سازه‌های اطراف گود در برابر نیروهای دینامیکی از قبیل زلزله است.

۴-۱- مدلسازی عددی در نرم‌افزار PLAXIS

۴-۱-۱- بیان مسئله

در این مقاله، مدلسازی بر پایه روش عددی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار دوبعدی PLAXIS انجام شده است. مدلسازی برای دیوارهای عمیق و نیمه عمیق با یک ردیف مهار در عمق مشخص شده براساس ضوابط توصیه شده



شکل ۳: شکل شماتیک مدل مورد نظر

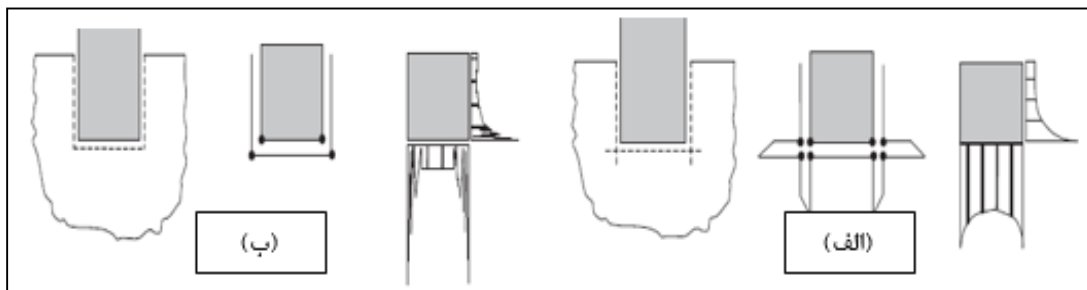
جدول ۱: مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه خاکی مورد استفاده در مدل

چسبندگی خاک (KPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	نسبت پواسن	سختی خاک (KPa)	زاویه اتساع (درجه)	وزن مخصوص خاک (KN/m ³)	نسبت میرایی (α, β)	R (Interface)
۱۰	۳۸	۰/۳	۳۰۰۰۰	۴	۲۰	۰/۰۱	۰/۷۵

شود که به آن میرایی وابسته به فرکانس نیز می‌گویند. α , β ضرایب ترکیب خطی رایلی است. برای انتخاب ضخامت و ارتفاع دیوار دیافراگمی از آیین نامه FHWA استفاده شده است، در این تحقیق برای عمق دیوار برای خاک‌های ماسه‌ای نسبت ارتفاع دیوار به عمق گود بین ۱/۱ تا ۲ بوده و این نسبت برای خاک‌های رسی بین ۱/۱ تا ۲/۵ است. همچنین ضخامت دیوار دیافراگمی هم به طور معمول بین ۰/۵ تا ۱/۵ متر متغیر است. جدول ۲ مشخصات دیوار دیافراگمی استفاده شده در مدل موردنظر را نشان می‌دهد.

هر فصل مشترکی در مدل با المان PLATE یک ضخامت مجازی به خود می‌گیرد که خواص مشخصی برای آن در نظر می‌گیرد. خواص مصالح در فصل مشترک با یک فاکتور کاهش مقاومت کنترل می‌شود. در شکل ۴ نحوه تماس مدل با خاک از طریق المان فصل مشترک و بدون المان فصل مشترک مشخص است.

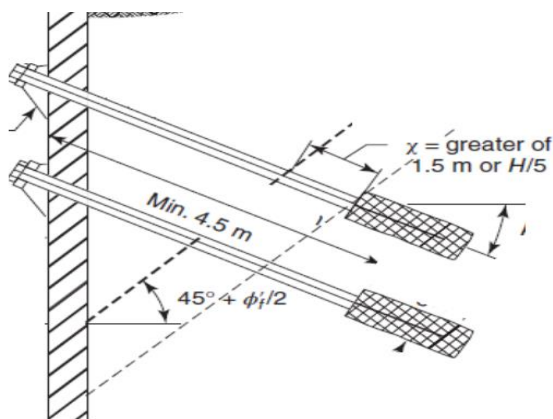
برای بررسی رفتار دینامیکی دیوار دیافراگمی ابتدا باید فرکانس مودهای ارتعاش دیوار محاسبه شود تا بتوان با داشتن ضرایب میرایی سازه براساس میرایی رایلی محاسبه



شکل ۴: (الف) با استفاده از المان فصل مشترک. (ب) بدون استفاده از المان فصل مشترک

جدول ۲: مشخصات دیوار دیافراگمی

ضخامت دیوار (m)	نسبت میرایی (α, β)	ارتفاع دیوار (m)	ضریب پواسن	مدول الاستیسیته (KP)	وزن مخصوص بتن (KN/M^3)
۰/۵	۰/۰۰۱	۱۲	۰/۱۲	2×10^7	۲۵

شکل ۵: طول غیر چسبنده مهار ($X=1.5m \text{ or } H/5$)

۴-۳- مرزهای جاذب

در کارهای دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS شرایط مرزی خاصی برای در نظر گرفتن این واقعیت که در طبیعت خاک به صورت یک محیط پیوسته نیمه محدود است، باید در نظر گرفته شود. برای اجتناب از این بازتاب‌های غیر واقعی، مرزهای جاذبی در زیر و در پشت دیوار دیافراگمی در سمت توده خاک در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

۴-۴- بارگذاری

بارگذاری در سه مرحله انجام شد، مرحله ژئواستاتیک، جهت در نظر گرفتن تنش‌های درجای خاک، مرحله استاتیک برای بارگذاری ناشی از وزن سازه و بارگذاری دینامیکی که به صورت تاریخچه زمانی در بستر سنگی به مدل اعمال شده است. جهت بارگذاری دینامیکی شتاب نگاشت‌های زلزله‌های طیس، بم و رودبار مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۵- روند ساخت و گودبرداری

در گام اول دیوار دیافراگمی مسلح با ضخامت ۰/۵ متر و طولی برابر با ۱۲ متر ساخته شده است. در مرحله دوم گودبرداری در جلوی دیوار از سطح رمین تا عمق ۳/۵ متر انجام می‌شود. مرحله سوم هم ساخت یک ردیف انکر با زاویه تمایل ۱۵ درجه نسبت به افق و دارای نیروی پیش‌تنیدگی ۷۰ KN/m است. در مرحله چهار ادامه گودبرداری تا عمق

یک ردیف مهار برای دیوار در نظر گرفته شده که با توجه به آیین نامه FHWA محل ردیف اول مهار حداقل در فاصله ۳ متر از سطح زمین قرار داشته باشد که در پروژه مورد نظر این فاصله برابر ۳/۵ متر است. همچنین نیروی قابل انتقال مهار هم با توجه به نوع خاک و عدد SPT از جدول ۳ به دست می‌آید. همچنین از طریق رابطه ۱ می‌توان با توجه به نیروی قابل انتقال، طول چسبندگی مهار را نیز به دست آورد. رابطه ۲ هم نشان دهنده بیشینه طول مورد نیاز مهار درون دیوار دیوار است. در رابطه‌های ۱ و ۲ DL نیروی طراحی مهار، و سربارهای احتمالی، d فاصله مهارها، F.S ضریب اطمینان ظرفیت باربری، F نیروی قابل انتقال توسط انکر، α زاویه‌ی مهار با سطح افق است [۱۶].

جدول ۳: تعیین ظرفیت باربری مهار

نیروی قابل انتقال (KN/m)	عدد SPT	نوع خاک
۷۰	سست (۴-۱۰)	سست
۱۰۰	متراکم متوسط (۱۱-۳۰)	متراکم متوسط
۱۳۰	متراکم (۳۱-۵۶)	متراکم

محاسبه طول چسبندگی دوغاب:

$$DL = (T \times d) / \cos \alpha \quad (1)$$

$$L_{\max \text{ Bond } L} = (DL \times F.S) / F \quad (2)$$

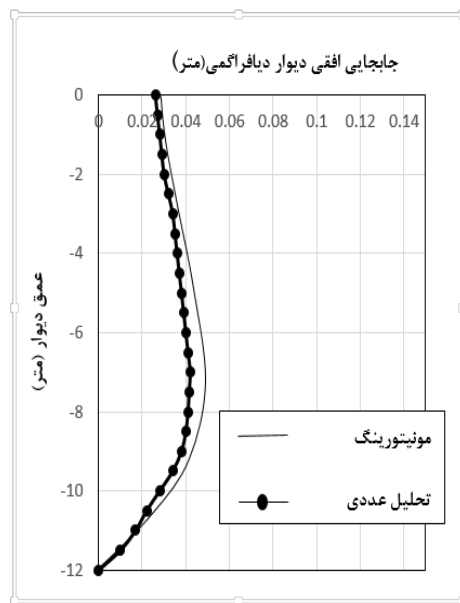
مشخصات مهار مورد استفاده در جدول ۴ به طور کامل آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات مهار مورد استفاده

فاصله مهارها (m)	EA (KN)
۲/۳	$4/6 \times 10^5$

با توجه به اینکه طول غیر چسبنده مهار (آزاد) هم باید بیش‌ترین مقدار (H/5, 1.5) از پشت گوه گسیختگی فاصله داشته باشد، در این مطالعه این طول ۱۲ متر در نظر گرفته شد. فاصله معمول بین مهارها هم بین (۲ تا ۳) متغیر است که در این پروژه ۲/۳ در نظر گرفته شده است. شکل ۵ نشان دهنده نحوه محاسبه طول غیر چسبنده مهار است.

اصلاحات بر روی سایت قرار می گیرند. همان طور که در شکل ۷ مشخص است، شتاب نگاشت زلزله طبس به طور دیجیتالی آورده شده است با توجه به اینکه این رکوردها اصطلاحاً خام بوده است، برای استفاده در مدلسازی های عددی باید اصلاحات بیشتری روی آنها انجام گیرد. در این مقاله داده های زلزله طبس، بم و رودبار مورد تصحیح و مقیاس بندی قرار گرفت.



شکل ۶: مقایسه نمودار جابجایی در تحلیل عددی و مونیتورینگ

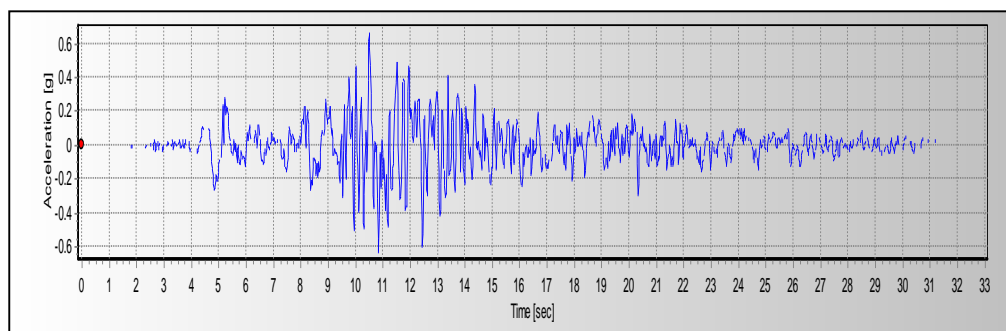
۱۰ متر است. مرحله آخر صفر کردن جابجایی ها و اعمال نیروی زلزله است.

۴-۶- صحت سنجی مدلسازی

به منظور انتخاب هندسه الگوی پایه تحلیل های پارامتری پژوهش حاضر، از پژوهش های موردی گزارش شده در متون فنی استفاده شد. کمال محمدحافظ و ابراهیم عصمت^{۱۰} مطالعاتی روی گودی که در کنار یک ساختمانی واقع شده و با دیوار دیافراگمی محافظت شده انجام دادند و یکسری نتایج از این تحقیق حاصل شد، لذا در پژوهش حاضر جهت صحت سنجی نرم افزار و الگوی پایه از آن استفاده شده است. در این مقاله با استفاده از تحلیل عددی، تغییر شکل های افقی تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی در یکی از گودبرداری های مصر جهت آنالیز برگشتی و تعیین مشخصات لایه های خاک، اندازه گیری شده است. در این روش گودبرداری از دیوار دیافراگمی بتنی استفاده شده بود و در این پژوهش با استفاده از نرم افزار PLAXIS به بررسی نتایج حاصله پرداخته شد [۱۷]. مقایسه نتایج مونیتورینگ و تحلیل عددی مدلسازی در شکل ۶ آورده شده است.

۴-۷- تصحیح داده های شتاب نگاشت

رکورد هایی که از دستگاه شتاب سنج به دست می آیند پس از طی مراحل به صورت دیجیتال در آمده و با اعمال



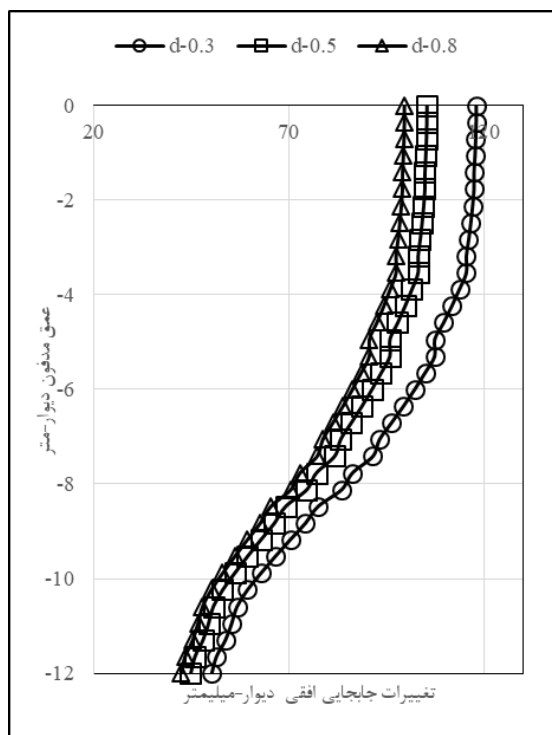
شکل ۷: شتاب نگاشت زلزله طبس

کمتر بوده است که در اینجا فقط به دلیل اهمیت و تاثیر شدید زلزله بم در منطقه، این زلزله انتخاب شد.

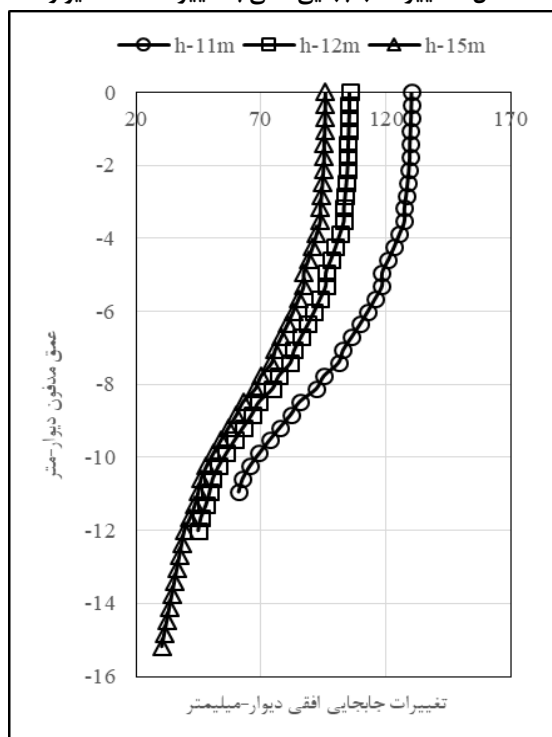
جدول ۵: زمان موثر زلزله های مختلف

نام ایستگاه	زمان موثر در زلزله (sec)
طبس	۱۶/۵۴
بم	۸
رودبار	۲۸/۶۶

براساس آیین نامه ۲۸۰۰ برای مقیاس کردن زلزله ها، ابتدا باید، مدت زمان حرکت شدید زمین برای هر زلزله حداقل برابر با ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه هر کدام که بیشتر است، انتخاب شود. در جدول ۵ زمان موثر زلزله های طبس، بم و رودبار مشخص است و مدت زمان حرکت شدید رکورد زلزله طبس و رودبار از ۱۰ ثانیه بیشتر است، به استثناء زلزله بم که مدت زمان موثر آن از ۱۰ ثانیه



شکل ۸: تغییرات جابجایی افقی با تغییر ضخامت دیوار



شکل ۹: تغییرات جابجایی افقی دیوار با تغییر عمق مدفون دیوار ولی برای بیشینه لنگر خمشی تاثیر ارتفاع دیوار با افزایش عمق دیوار لنگر خمشی بیشینه هم تغییر بیشتری دارد. به طوری که با افزایش نسبت ضخامت به ضخامت متوسط از ۰/۶ به ۱ و ۱/۶ درصد افزایش بیشینه لنگر خمشی

سپس کلیه شتاب نگاشت‌ها باید به مقدار حداکثر خود مقیاس شوند بدین معنی که حداکثر شتاب همه آنها برابر با شتاب ثقل (g) شده و در نهایت طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد تعیین می‌شوند. طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات (SRSS) با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحدی برای هر زوج ساخته می‌شود. طیف پاسخ ترکیبی سه زوج شتاب نگاشت، متوسط گیری شده و در محدوده زمان تناوب $0.2T$ و $1.5T$ با طیف طرح استاندارد مقایسه می‌گردد. ضریب مقیاس آنچنان تعیین می‌شود که در این محدوده مقادیر متوسط در هیچ حالت کمتر از $1/4$ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. با در نظر گرفتن ضریب مقیاس و اعمال آن به فایل مورد نظر در نرم‌افزار PLAXIS مرحله اعمال نیروی دینامیکی پایان می‌یابد [۱۸].

۵- تحلیل نتایج دینامیکی

در این پژوهش، تحلیل کامل دینامیکی به عنوان روشی دقیق جهت پیش‌بینی پاسخ رفتار لرزه‌ای در هر لحظه از زمان زلزله مورد استفاده قرار گرفته شده است.

در این پروژه به بررسی و مقایسه نتایج دینامیکی برای تغییرات هندسی دیوار و تغییرات مشخصات مکانیکی خاک پرداخته شده است. برای مقایسه نتایج تغییرات هندسی تغییر ضخامت و ارتفاع دیوار و برای تغییرات مکانیکی خاک دو پارامتر مدول الاستیسیته و چسبندگی خاک که البته به هم وابسته هستند در نظر گرفته شده است.

۵-۱- تاثیر پارامترهای هندسی دیوار

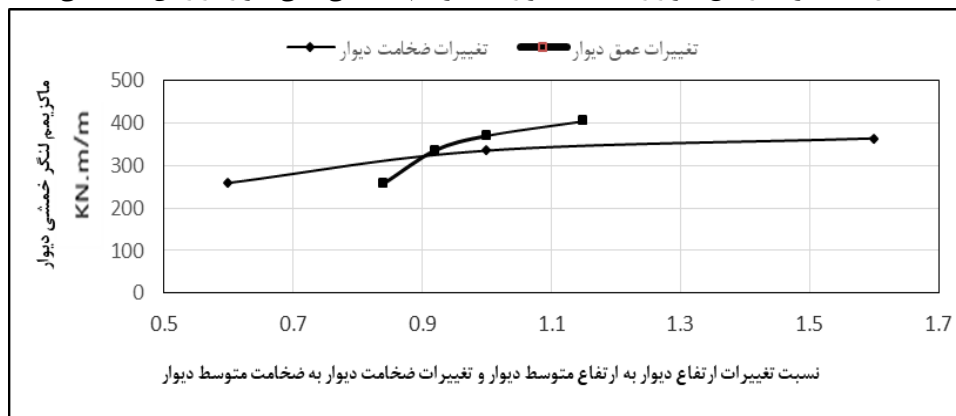
شکل‌های ۸ و ۹ نمودار غیرنرمال تغییرات جابجایی دیوار در زمان دینامیکی با تاثیر ضخامت و عمق مدفون را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی تاثیر ضخامت و ارتفاع دیوار دیافراگمی تحت بار دینامیکی از سه دیوار دیافراگمی با ضخامت ۰/۳، ۰/۵، ۰/۸ و نسبت عمق دیوار به عمق گود ۱/۱ و ۱/۲ و ۱/۵ در مدل بررسی شده استفاده شد و نتایج آن همان طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است، نسبت تاثیر تغییر ضخامت دیوار و ارتفاع دیوار دیافراگمی بر جابجایی افقی دیوار در زمان دینامیکی تقریباً مشابه هم است.

۳۰ و ۴۰ درصد است. در صورتی که با افزایش نسبت عمق دیوار به عمق متوسط دیوار از ۰/۸۴ به ۰/۹۲، ۱ و ۱/۱۵ درصد افزایش بیشینه لنگر خمشی به ترتیب ۳۰، ۴۳ و ۵۷ درصد است.



شکل ۱۰: تغییرات ارتفاع دیوار و ضخامت دیوار به ماکزیمم جابجایی افقی دیوار در زمان دینامیکی



شکل ۱۱: تغییرات ارتفاع دیوار و ضخامت دیوار به ماکزیمم لنگر خمشی دیوار در زمان دینامیکی

دارای چسبندگی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع مورد بررسی قرار گرفت. که نتایج آن تقریباً با نتایج مدل مورد نظر که با خاک متفاوت دیگری که مدول الاستیسیته آن متغیر از ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۰ مگا پاسکال است، مشابه است. همچنین نتایج لنگر خمشی هر دو مشخصه مکانیکی هم تقریباً با هم برابر است. که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ فقط تغییرات چسبندگی روی جابجایی دیوار و لنگر خمشی آن نمایش داده شده است.

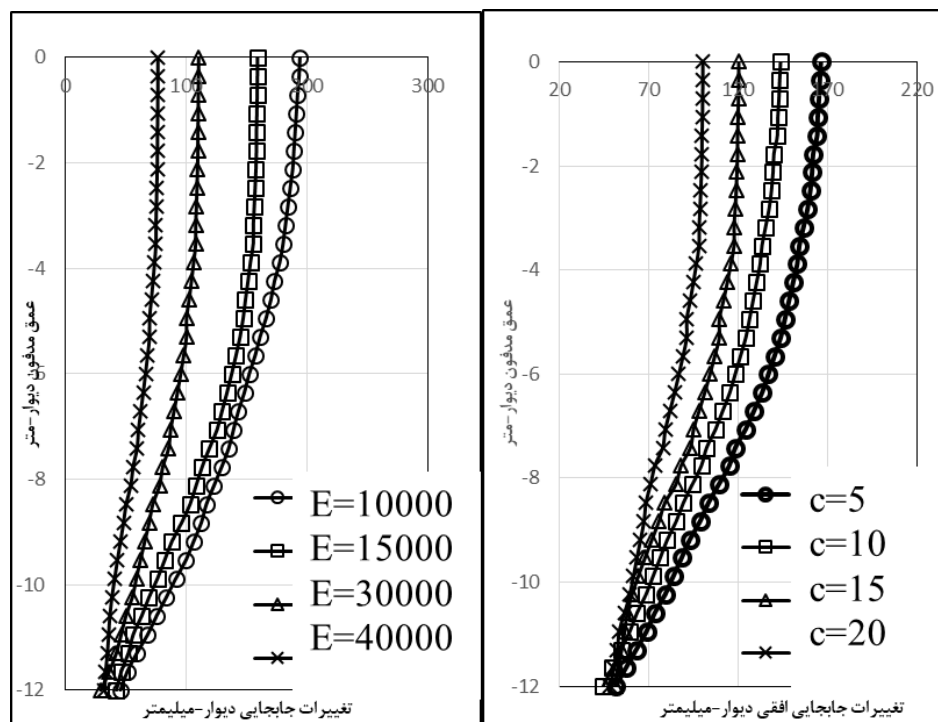
۵-۳- تاثیر طول مهار در نتایج

معمولاً عملکرد لرزه‌ای سازه نگهبان با افزایش طول مهار بهبود میابد. طول مهارها معمولاً مابین (۱۲ تا ۲۱) متر متغیر است در این مقاله طول مهار با تغییر از ۱۲ به ۱۵ و ۱۸ متر در نرم افزار مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج آن در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشخص است.

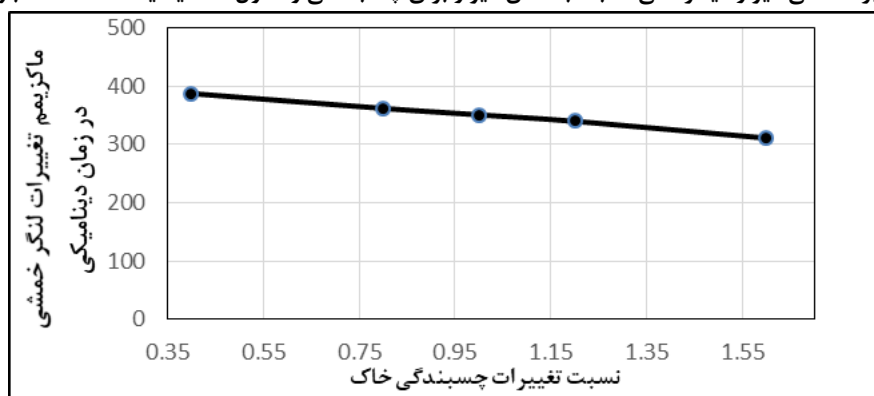
۵-۲- تاثیر پارامترهای مکانیکی خاک

در شکل ۱۲ نمودار غیرنرمال جابجایی افقی دیوار دیافراگمی تحت بار زلزله با تاثیر چسبندگی خاک و مدول الاستیسیته مشخص است. برای لنگر خمشی با تغییر مدول الاستیسیته از ۱۰ به ۱۵، ۳۰ و ۴۰ مگا پاسکال، درصد کاهش لنگر خمشی بیشینه در حدود ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۹ درصد و همچنین برای پارامتر چسبندگی خاک با تغییر از ۵ به ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع کاهش ماکزیمم لنگر خمشی به ترتیب ۷، ۹، ۱۱ و ۲۰ درصد است. قابل ذکر است که با تغییر چسبندگی، مدول الاستیسیته هم تغییر می‌کند. در شکل ۱۲ نمودار جابجایی افقی دیوار دیافراگمی تحت بار زلزله با تاثیر چسبندگی خاک و مدول الاستیسیته مشخص است.

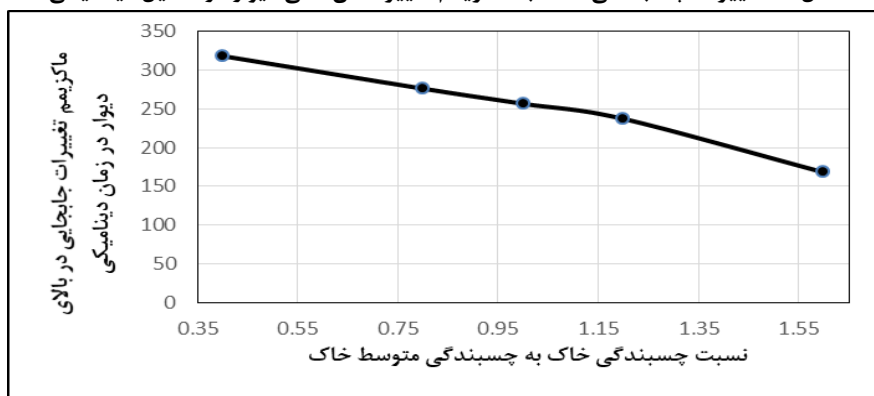
به منظور بررسی تاثیر چسبندگی خاک روی دیوار دیافراگمی تحت بار دینامیکی از چهار خاک متفاوت که



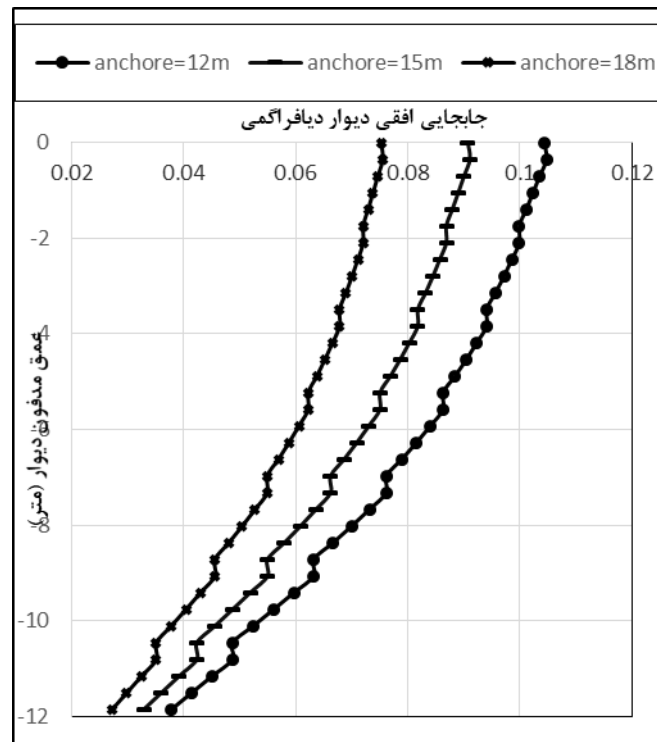
شکل ۱۲: تغییرات افقی دیوار دیافراگمی نسبت به عمق دیوار برای چسبندگی و مدول الاستیسیته خاک تحت بار دینامیکی



شکل ۱۳: تغییرات چسبندگی خاک به ماکزیمم تغییر مکان افقی دیوار در تحلیل دینامیکی



شکل ۱۴: تغییرات چسبندگی خاک به ماکزیمم تغییرات لنگر خمشی دیوار در تحلیل دینامیکی

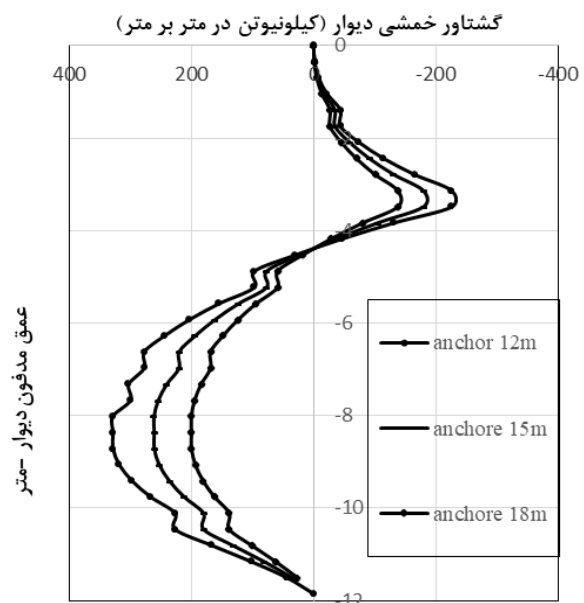


شکل ۱۵: تغییرات طول مهار و تاثیر آن روی جابجایی دیوار دیافراگمی

در تحقیق مورد نظر برای بررسی و تجزیه تحلیل گودبرداری تحت بارهای دینامیکی دیوار دیافراگمی با مهار پیش‌تنیده مورد استفاده قرار گرفته است. به علت اینکه دیوار دیافراگمی تنها برای بررسی بار دینامیکی اصلاً مناسب نبوده و سبب تخریب گود و در نهایت ایجاد خسارت می‌شود. برای بررسی مدل اصلی از یک ردیف مهار استفاده شده، بعد از تجزیه تحلیل مقدار نیروی پیش‌تنیدگی مهار 70 KN/m به دست آمد. در اینجا با تغییر نیروی پیش‌تنیدگی تاثیرات آن را روی دیوار با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ می‌توان مشاهده کرد.

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشخص است با افزایش نیروی اولیه مهار از ۷۰ تا ۳۲۵ کیلونیوتن بر متر، نیروی نهایی مهار در زمان دینامیکی تقریباً ثابت بوده همان‌طور که در شکل ۱۷ مشخص است نمودار تغییر آنچنانی نکرده است، ولی از نیروی ۳۲۵ کیلونیوتن که نیروی تعادل اولیه محسوب می‌شود نیروی نهایی مهار با نیروی اولیه مهار برابر بوده و همان مقدار اولیه که به نرم‌افزار داده شده را تولید می‌کند. این نشان می‌دهد که نیروی اولیه پیش‌تنیده را نباید برای اطمینان بیشتر از مقدار تعادل افزایش داد.

همان‌طور که از شکل ۱۸ مشخص است اگر نیروی پیش‌تنیدگی از مقدار تعادل افزایش یابد، جابجایی افقی



شکل ۱۶: تغییرات طول مهار و تاثیر آن روی گشتاور خمشی دیوار دیافراگمی

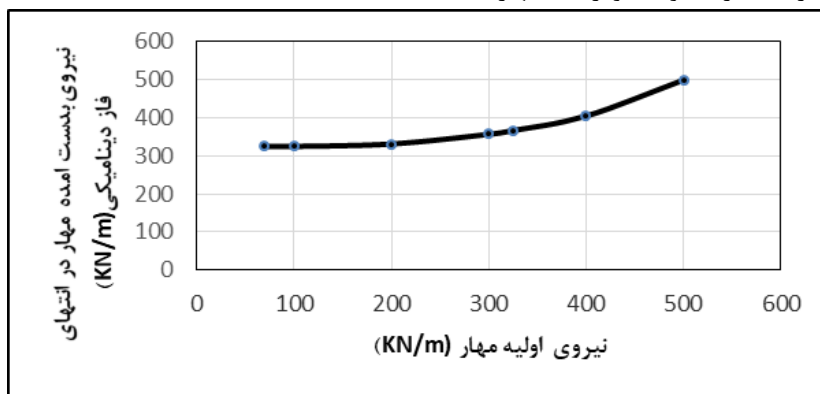
با افزایش طول مهار پیش‌تنیده در پشت دیوار از ۱۲ به ۱۵ و ۱۸ متر به ترتیب درصد کاهش جابجایی به ۱۵ و ۳۰ درصد شد و برای گشتاور خمشی دیوار هم به ترتیب ۱۹ و ۳۸ درصد کاهش یافت.

۴-۵- تاثیر نیروی پیش‌تنیدگی مهار

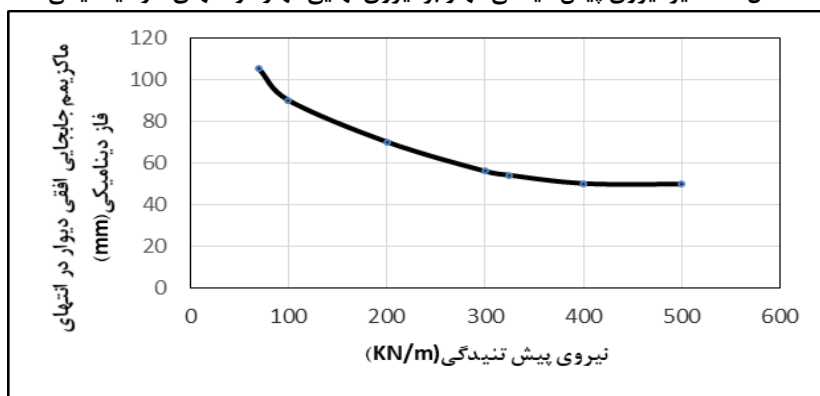
درصد میزان جابجایی کاهش میابد. بنابراین برای ساخت دیوار حائل در گودهای عمیق در مناطق زلزله خیز بارگذاری دینامیکی باید مد نظر قرار گیرد. نمودار های ماکزیمم جابجایی افقی دیوار برای دیوار دیافراگمی با چند ردیف مهار در شکل ۱۹ مشخص است.

دیوار ثابت مانده و تغییر نمی‌کند. پس لازم نیست نیروی پیش‌تنیدگی را افزایش داد.

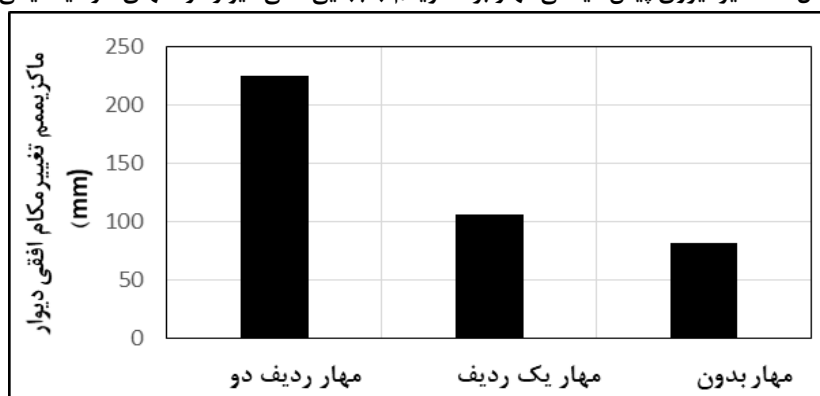
با افزایش تعداد ردیف‌های مهار در دیوار دیافراگمی میزان بیشینه تغییرات جابجایی افقی دیوار در بارگذاری دینامیکی کاهش می‌یابد به طوری که از دیوار بدون مهار و دیوار با یک ردیف مهار ۵۳ درصد و با دو ردیف مهار ۶۳



شکل ۱۷: تاثیر نیروی پیش‌تنیدگی مهار بر نیروی نهایی مهار در انتهای فاز دینامیکی



شکل ۱۸: تاثیر نیروی پیش‌تنیدگی مهار بر ماکزیمم جابجایی افقی دیوار در انتهای فاز دینامیکی



شکل ۱۹: ماکزیمم جابجایی افقی دیوار در زمان دینامیکی برای دیوار دیافراگمی با چند ردیف مهار پیش‌تنیده

مناسب و دارای نتایج بهینه است زیرا ردیف دوم مهار تاثیر چندانی در رفتار دیوار ندارد.

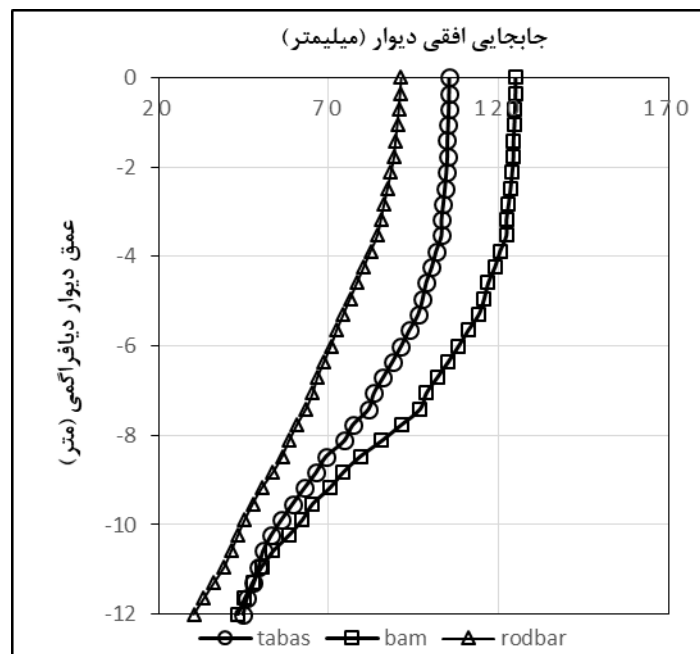
معمولا دیوار با مهار دارای انعطاف بالایی بوده و در نتیجه می‌تواند تغییر شکل‌ها و نیروهایی که در اثر زلزله ایجاد شده را تحمل کند. برای تحقیق مورد نظر دیوار با یک ردیف مهار

۵-۵-تاثیر زلزله‌های مختلف بر روی مدل

جدول ۶ نشان دهنده مشخصات ۳ زلزله مختلف از قبیل بزرگای زلزله، بیشینه شتاب افقی، بیشینه سرعت، بیشینه جابجایی و فرکانس زلزله است. در این بخش به بررسی تاثیر زلزله‌های مختلف روی مدل مورد نظر که با جابجایی افقی، لنگر خمشی دیوار دیافراگمی بررسی شده می‌پردازد. در این جدول از مشخصات سه زلزله طبس، بم و رودبار استفاده شد.

جدول ۶: مشخصات زلزله‌های مختلف

زلزله	بزرگا (ریشتر)	ماکزیمم شتاب (g)	بیشینه سرعت (cm/s)	بیشینه جابجایی (cm)	فرکانس زلزله (HZ)
طبس	۷/۸	۰/۶۶	۹۸/۸۴	۳۷/۵	۴/۲
بم	۶/۶	۰/۸	۱۲۴/۱۲	۳۳/۹	۰/۶۱
رودبار	۷/۴	۰/۵۱	۴۲/۴۵	۷۸/۱	۲/۹۳



شکل ۲۰: جابجایی افقی دیوار دیافراگمی ناشی از زلزله‌های مختلف

$$f = (2n-1)v_s / 4H$$

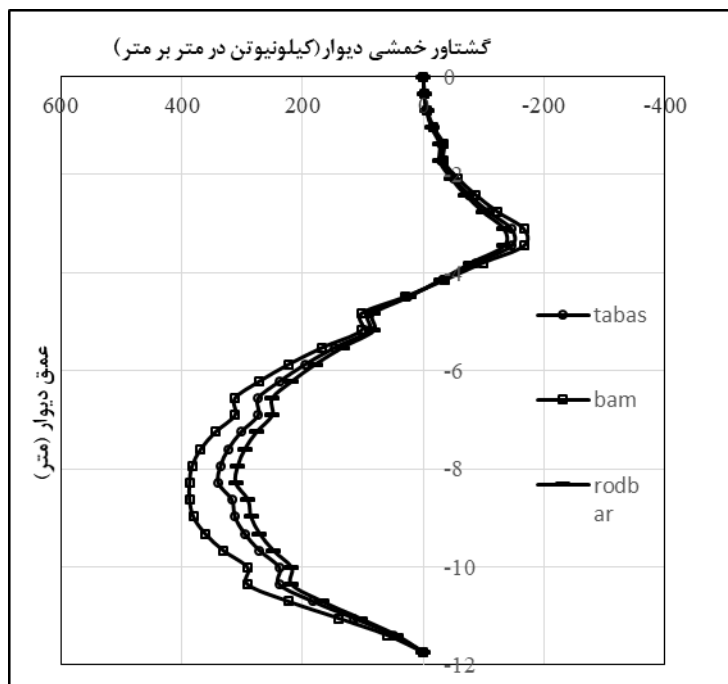
(۴)

V_s : سرعت موج برشی خاک، G : مدول برشی خاک، p : چگالی خاک، E : سختی خاک، v : نسبت پواسن خاک، f : فرکانس طبیعی خاک با ضخامت متوسط H

شکل ۲۱ نشان دهنده نمودار گشتاور خمشی دیوار دیافراگمی ناشی از زلزله‌های بم، طبس و رودبار بوده است که زلزله بم در حدود ۲۰ درصد با افزایش گشتاور خمشی روبرو است.

سرعت موج برشی خاک در حدود ۷۵m/s است که با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید و فرکانس طبیعی خاک و دیوار هم از رابطه (۴) که برابر ۰/۴HZ است. از آنجایی که این فرکانس به فرکانس زلزله بم نزدیک است بیشترین جابجایی را زلزله بم روی دیوار دارد. بیشتر جابجایی‌های دینامیکی در بالای دیوار مقدار بیشتری دارند. در حالی که بیشینه جابجایی استاتیکی در یک سوم میانی دیوار از پنجه است.

$$V_s = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{E/2\rho(1+\nu)} \quad (۳)$$



شکل ۲۱: گشتاور خمشی دیوار دیافراگمی بر اساس زلزله‌های مختلف

۶- نتیجه گیری

- اگر نیروی اولیه پیش‌تنیدگی از مقدار تعادل بیشتر انتخاب شود در نهایت نیروی نهایی مهار بدون تغییر همان مقدار در انتهای زلزله بدست می‌آید. همچنین جابجایی افقی دیوار دیافراگمی در انتهای فاز دینامیکی نشان می‌دهد که با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی مهار از مقدار تعادل باعث می‌شود که جابجایی افقی تغییر نکند.

- با بررسی و انجام تحلیل‌ها یک رابطه بین شتاب بیشینه افقی زلزله و پاسخ دیوار به دست آمد که نشان می‌دهد با افزایش ۳۰ درصدی شتاب، بیشینه جابجایی زلزله حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Gazetas, G. Psarropoulos, P. N., Anastasopoulos, I., Gerolymos, N. (2004). "Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24:537-550.
- [2] Mir Mohammad hosieni, S.M. (2008). "The Principles of Soil Dynamic", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. (In Persian).
- [3] Ostadan, F. (2008). "Seismic Soil Pressure for Building Walls-An Updated Approach", Bechtel Technology Journal, Volume 1, Number 1.
- [4] Nogami, T. (1993). "Waterfront Sheet Pile Walls Subjected to Earthquake Shaking: Analysis method", Scripps institution of Oceanography

در این مقاله دیوار دیافراگمی همراه با مهار به عنوان یکی از روش‌های متداول برای حفاظت و نگهداری از گودهای عمیق تحت بار دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعات انجام شده تاثیر ارتفاع و ضخامت دیوار به علاوه بعضی از مشخصات مهم خاک، تعداد ردیف‌های مهار و نیروی پیش‌تنیدگی مهار در دیوار دیافراگمی در گود تحت بار دینامیکی بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

- با تغییر نوع خاک یعنی افزایش ۱/۵، ۳ و ۴ برابر مدول الاستیسیته خاک همراه با افزایش ۲، ۳ و ۴ برابر چسبندگی خاک میزان بیشینه جابجایی افقی در بالای دیوار به ترتیب با حدود ۲۵، ۵۳ و ۷۶ درصد کاهش داشته است و همچنین در همین شرایط لنگر خمشی روی دیوار به ترتیب حدود ۷، ۱۱ و ۲۰ درصد کاهش داشته است.

- در مقایسه مقادیر دینامیکی نسبت به استاتیکی میزان جابجایی بیش از دو برابر و میزان لنگر خمشی هم حدودا ۱/۳ برابر شده است. بنابراین با وجود اینکه آیین نامه‌ها اجازه می‌دهند میزان لنگرها و نیز جابجایی‌ها در زمان زلزله بیشتر از حالت استاتیکی شود، برای ساخت دیوار حائل در گودهای عمیق باید معیار دینامیکی هم در طراحی مدنظر قرار گیرد.

- [13] Ali Elahi, H. (2011). "In-situ Concrete Diaphragm Walls Designed on The Basis of Their Seismic Performance". Fourth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Iran. Iranian Geotechnical Society, Tehran. (In Persian).
- [14] Gill-Martin, L. M., Hernandez, E., Shin, M and Aschheim, M. (2012). "Developments in Excavation Bracing Systems", Journal of tunnelling and underground space technology, Elsevier. 31:107–116.
- [15] Plaxis 3D Foundation Vol1.6 User Manual: (2004). Delft University of Technology & Plaxis BV. Delft. Netherland.
- [16] Sabatini, P., Pass, J. D.; Bachus, R. C. (1999). "Ground Anchors and Anchored Systems", GeoSyntec Consultants 1100 Lake Hearn Drive Atlanta, Georgia. Resources Center Directors Division Administrators Federal Lands Highway Division Engineers. Washington D.C. 20590.
- [17] Kamal Mohamed Hafez Ismail Ibrahim, Tarek Esmat Ibrahim. (2013). "Effect of Historical Earthquakes on Pre-Stressed Anchor Tie Back Diaphragm Wall and on Near-by Building". Housing and Building National Research Center. Production and Hosting by Elsevier B.V. All Rights Reserved.
- [18] Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Sismic Resistant Design of Buildings. (2014). "Iranian Code of Practice for Sismic Resistant Design of Buildings Standard 2800, 4th Edition". Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran. (In Persian).
- University of California at San Diego. La Jolla. CA 92093.
- [5] Zeng, X. and Steedman, R.S. (1993). "On the Behavior of Quay Walls in Earthquakes", Geotechnique. 43(3), 417–431.
- [6] Fanchin, P. and Pinto, P.E. (2008). "Analysis of Diaphragm-type Bridge Abutments and After Seismic Upgrading", 1st US-Italy seismic bridge workshop.
- [7] Gol Pazir, I. Akhlaghi, T. (2008). "The Effect of Various Parameters on The Behavior of Cantilever Diaphragm Wall Using The Finite Element Method and Limit Equilibrium". Fifth National Congress of Civil Engineering. Ferdowsi University. Mashhad. (In Persian).
- [8] Choudhury, D. Sitharam, T. G. Subba Rao, K. S. (2004). "Seismic Design of Earth-Retaining Structures and Foundations". Current Science. Vol. 87. No. 10. pp. 1417-1425.
- [9] Kramer, SL. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, Upper Saddle River. NJ. 1996.
- [10] Kamal Mohamed Hafez Ismail Ibrahim., Tarek Esmat Ibrahim. (2013). "Effect of historical earthquakes on pre-stressed anchortie back diaphragm wall and on near-by building", HBRC Journal 9, 60–67.
- [11] Ou, C. Y. (2006). "Deep Excavation, Theory and Practice", Taylor & Francis, Netherlands.
- [12] Thomas, D. R.; Jr, P. E. (2006). "Diaphragm Wall", Central PA Geotechnical Conference, Hershey, Pennsylvania.
- ⁷- Muda and Comsavarao
- ⁸ -Nimbalkar
- ⁹- Sobaru and Chodhari
- ¹⁰- Kamal Mohamed Hafez and Tarek EsmatIbrahim
- ¹ -Mononobe-Okabe
- ² -Parkash and Basavana
- ³ -Seed and Whitman
- ⁴ -Kumar
- ⁵ -Devaikar and Halkud
- ⁶ -Kumar and Chitikila