

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

چکیده

یکی از روش‌های افزایش سختی و بهسازی خاک به ویژه در زمین‌های سست، استفاده از شمع‌های مسلح‌کننده (تقویت‌کننده) می‌باشد. از این نوع شمع‌ها می‌توان در محل پایه و زیر فونداسیون سازه‌ها به منظور کاهش لرزه‌ای زمین و سازه استفاده نمود. در این مقاله به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی شمع‌های تقویت‌کننده نظیر قطر، طول، فاصله بین آنها و سرباره وارده بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بر مبنای مدل پایه پل از میت ترکیه به عنوان مطالعه موردی، پرداخته شده است. عمق تأثیر با مقایسه طیف پاسخ شتاب سطح زمین مدل دوبعدی با حضور شمع‌های مسلح‌کننده با کمک نرم‌افزار FLAC2D به روش غیرخطی مدل هیستریزس، با عمق معادل طیف پاسخ شتاب مدل یک‌بعدی میدان آزاد به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت فاصله به قطر شمع‌های تقویت‌کننده (S/D) میزان عمق تأثیر به علت تقلیل سختی سیستم پی - شمع مسلح‌کننده کاهش می‌یابد و پس از رسیدن به نسبت ۵ به مقدار ثابتی می‌رسد. به عبارت دیگر با افزایش سختی سیستم خاک - شمع، اندرکنش سینماتیکی سیستم خاک - شمع افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت طول به قطر شمع‌های مسلح‌کننده (L/D)، میزان عمق تأثیر ابتدا افزایش یافته و سپس به مقدار ثابتی خواهد رسید که بهینه‌ترین بازه برای نسبت طول به قطر شمع‌ها در محدوده ۱۵ تا ۳۰ می‌باشد. علاوه بر این، با افزایش میزان نسبت سرباره وارده در بالای شمع‌های مسلح‌کننده (q̄)، میزان عمق تأثیر به صورت خطی افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: شمع‌های مسلح‌کننده، مدل عددی، پارامترهای هندسی، عمق مؤثر، طیف پاسخ.

تأثیر استفاده از شمع‌های مسلح‌کننده در کاهش حرکت لرزه‌ای سطح زمین

حمید علی‌الهی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران، h.alielahi@iauz.ac.ir

آرین قنبری بیرگانی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۱- مقدمه

فونداسیون نداشته و با یک لایه ارتباطی نظیر لایه شنی در خاک زیر فونداسیون به ویژه فونداسیون پایه‌های پل اجرا می‌شوند. در این راستا، رفتار این نوع از شمع‌ها در شرایط استاتیکی و دینامیکی مطرح است. مطالعات متعددی در مورد رفتار استاتیکی این شمع‌ها انجام شده است [۲] که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود. از جمله تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی این نوع از شمع‌های تقویت‌کننده می‌توان به مطالعات بارچارد [۳]، ون اکلن [۴] و با استفاده از مدل ساترئیفیورژ به مطالعات برگداهل و همکاران [۵]، کمپفرت و همکاران [۶]، الیس و اسلم [۷-۸] اشاره نمود. در واقع، بهسازی خاک به کمک شمع‌های تقویت

امروزه یکی از مسائل مهم در مهندسی زلزله و طراحی سازه‌های بزرگ، شناسایی خطرات لرزه‌ای موجود و میزان پتانسیل خرابی این سازه‌ها می‌باشد [۱]. نیاز به ساخت سازه‌ها بر روی خاک‌های نرم و غیر پایدار با توجه به شرایط مناسب فنی و اقتصادی، سبب پیدایش روش‌های متنوع بهسازی خاک شده است. یکی از روش‌های بهسازی خاک، استفاده از شمع‌های مسلح (تقویت‌کننده)^۱ می‌باشد. این نوع از شمع‌ها اغلب در زیر فونداسیون‌ها احداث شده و صرفاً نقش بهسازی خاک و افزایش سختی خاک زیر شالوده به ویژه در زمین‌های سست را دارند. لازم به ذکر است که این نوع از شمع‌ها اتصال مستقیم به

به این نتیجه رسیدند که به منظور بهسازی خاک‌های روانگرا، بایستی لایه ۲۰ تا ۳۰ متری ابتدایی خاک را اصلاح نمود. در این راستا از شمع‌های فلزی مسلح کننده به صورت کوبشی در زیر پایه‌های پل استفاده نمودند. همچنین ژانگ و همکاران [۱۸] پاسخ‌های غیرخطی و خطی معادل پایه پل از میت ترکیه واقع بر شمع‌های مسلح کننده را مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه، هوانگ و همکاران [۱۹] به مطالعه تأثیر حضور شمع‌های مسلح کننده در خاک‌های روانگرا پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که استفاده از شمع‌های مسلح کننده موجب کاهش تغییر شکل بزرگ در خاک‌های روانگرا شده که این کاهش محسوس به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر شرایط جانمایی شمع‌ها قرار دارد. در این تحقیق توصیه شده است که اگر لایه‌های خاک در اعماق پایین شامل خاک‌های ماسه‌ای متوسط یا متراکم باشد، بایستی ضخامت تقریبی لایه ارتباطی (لایه شنی) حداقل ۱ یا ۲ متر لحاظ شود.

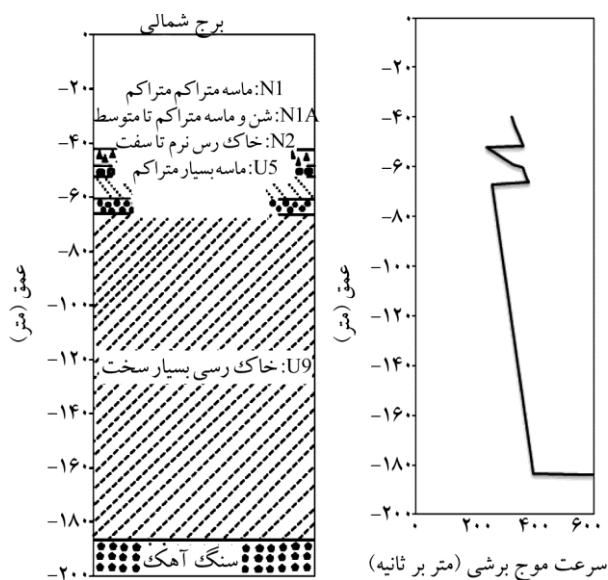
به طور کلی در مطالعات متداول لرزه‌خیزی^۲، برای سازه‌های مهم، اغلب مطالعات تحلیل لرزه‌ای ساختگاه بر مبنای تحلیل‌های یک‌بعدی انجام می‌شود و از اثر المان‌های مدفون نظیر شمع‌های مسلح کننده در زیر فونداسیون سازه‌ها می‌تواند موجب افزایش سختی خاک و به دنبال آن کاهش اثرات پاسخ لرزه‌ای زمین و سازه شود. این تحقیق به بررسی عوامل مختلف بر عمق تأثیر در مقایسه با شرایط بدون حضور شمع (مدل میدان آزاد^۳) و تحلیل نتایج حاصل از حضور شمع‌های مسلح کننده بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در قالب مطالعات پارامتریک پرداخته است. در این راستا، عمق تأثیر با مقایسه طیف پاسخ شتاب سطح زمین مدل دوبعدی با حضور شمع‌های مسلح شده با کمک نرم‌افزار FLAC2D، با عمق معادل طیف پاسخ شتاب در مدل میدان آزاد به دست آمده است. در ادامه در قالب مطالعات پارامتریک به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی شمع‌های تقویت کننده نظیر طول، قطر، فاصله بین شمع‌ها و سرباره وارده بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بر مبنای مدل پایه پل از میت ترکیه به عنوان

کننده برای خاک‌ریزها و شالوده‌ها گسترش چشم‌گیری داشته است [۹]. از کاربردهای اصلی این نوع از شمع‌ها می‌توان به مواردی همچون تثبیت خاک‌ریز جاده‌ها و ریل‌ها [۱۰]، گسترش جاده‌های از پیش ساخته شده [۱۱-۱۲] اشاره نمود. به علت افزایش شبیه‌سازی‌های عددی و از طرفی استفاده روز افزون از شمع‌های مسلح کننده، گومز پرز و ملنتیجویچ [۹] به مقایسه نتایج مدل تحلیلی و عددی این نوع شمع‌ها پرداختند. نتیجه تحقیقات آنها نشان داد که اگر مسلح کننده‌ها به صورت صلب در خاک‌های نرم استفاده شوند، نشست‌های تخمینی حاصل از مدل تحلیلی به نتایج مدل عددی نزدیک خواهند شد. در ادامه، براینکو و همکاران [۱۳] در یک مطالعه موردی با استفاده از روش عددی و مشاهدات انجام شده بر استفاده از شمع‌های تقویت کننده در یک منطقه صنعتی با نسبت استفاده از ۲/۲ درصد در مساحت کل منطقه تحت پوشش، به این نتیجه رسیدند که تنش اعمال شده به سر شمع‌ها بر مبنای پدیده قوس‌زدگی ترازقی [۱۴] بوده و فشار وارد شده به شمع‌ها تقریباً معادل شش برابر فشار وارده بر خاک است.

در ادامه، مایورال و همکاران [۱۵]، مطالعات گسترده‌ای را بر تأثیر سیستم شمع منفرد و خاک بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه انجام دادند. در مطالعات ایشان نشان داده شد که لایه ارتباطی بین شمع‌های مسلح کننده و پی سازه می‌تواند نقش مهمی در کاهش حداکثر شتاب سطح زمین داشته باشد. همچنین تحقیقات آنها نشان داد که استفاده از سیستم مسلح کننده شمع - خاک می‌تواند شتاب حداکثر را به میزان ۱۷ درصد کاهش دهد. رانژل و همکاران [۱۶] یک مطالعه عددی دوبعدی برای دو پروفیل خاک مسلح شده با استفاده از شمع‌های مسلح کننده در مکزیکوسیتی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که حضور شمع‌های مسلح کننده می‌تواند منجر به افزایش پاسخ ساختگاه به ویژه در پیوندهای بالاتر از ۱/۵ ثانیه شود. همچنین با کاهش نسبت فاصله به قطر این نوع از شمع‌ها، طیف پاسخ شتاب زمین، کاهش می‌یابد. بیسیداسکی و همکاران [۱۷] رفتار لرزه‌ای شالوده‌های پل ریون آتریون یونان را مورد تحقیق قرار دادند و

۲-۱- شرایط ژئوتکنیکی

بستر در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل خاک بستر زیرین پایه شمالی پل از میت ترکیه می‌باشد. شرایط خاک بستر در نظر گرفته شده در این پروژه شامل: ۱۰ متر خاک ماسه‌ای سیلت‌دار با تراکم پایین تا متوسط و در زیر آن ۱۲۷ متر از ماسه متراکم تا رس سخت وجود دارد و سنگ بستر تقریباً ۱۴۴ متر پایین‌تر از سطح خاک واقع شده است [۱۸]. پروفیل ژئوتکنیکی خاک و سرعت موج برشی طراحی در شکل (۲) [۱۸] و لایه‌بندی‌های خاک و پارامترهای مورد نظر در جدول (۱) آورده شده است [۲۰].



شکل (۲): نمودار سرعت موج برشی در عمق و پروفیل ژئوتکنیکی منطقه مورد نظر [۱۹].

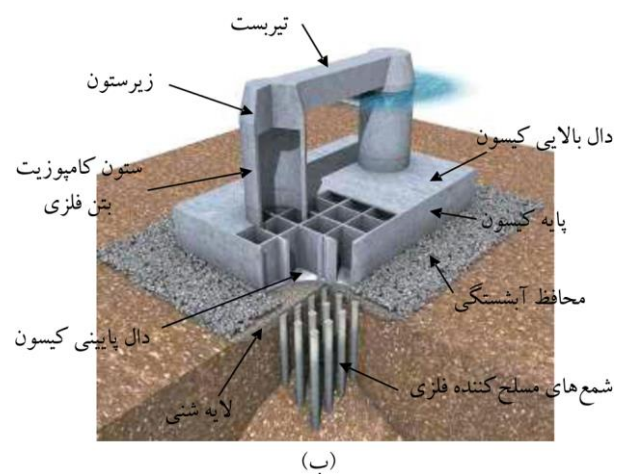
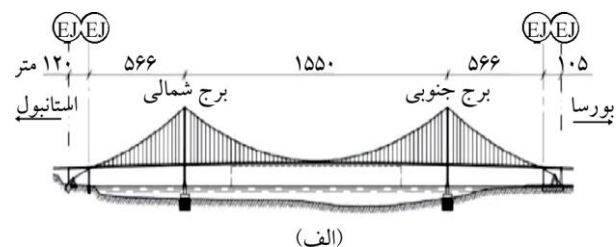
جدول (۱): مشخصات مکانیکی لایه‌بندی خاک در محل پایه پل از میت ترکیه [۲۰].

| نام لایه خاک | تراز فوقانی (متر) | γ (کیلو نیوتن بر مترمکعب) | S_u (کیلو نیوتن بر مترمربع) | ϕ (درجه) |
|--------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Gravel | -۴۰/۰ | ۱۸/۰ | - | ۴۵ |
| N1 | -۴۳/۰ | ۱۷/۵ | - | ۴۰ |
| N1A | -۴۷/۰ | ۱۸/۰ | - | ۳۵ |
| N2 | -۵۱/۵ | ۱۸/۶ | ۷۷ تا ۹۶ | - |
| U5(N3/5) | -۶۰/۵ | ۱۹/۰ | - | ۳۸ |
| U9 | -۶۴/۵ | ۱۸/۹ | ۳۴۱ تا ۱۰۴ | - |
| U9A | -۱۷۷/۱ تا -۱۸۴/۷ | ۱۸/۹ | ۴۰۰ | - |

مطالعه موردی و مدل مینا، پرداخته شده است. همچنین به منظور کاربردی نمودن نتایج، روابط تجربی برای در نظرگیری تأثیر هر کدام از پارامترهای یاد شده بر عمق تأثیر ارائه شده است.

۲- معرفی مطالعه موردی به‌عنوان مدل مینا

در این مقاله، پل از میت ترکیه به‌عنوان مطالعه موردی و مدل مبنای مطالعات پارامتریک مدنظر قرار گرفته است. پل از میت ترکیه (شکل ۱) در یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان در نزدیکی گسل شمالی آناتولین^۴ واقع شده است. این پل یکی از بلندترین پل‌های کابلی جهان با دو پایه شمالی و جنوبی می‌باشد که دهانه آزاد بین دو پایه شمالی و جنوبی آن ۱۵۵۰ متر است. پایه‌های پل بر روی خاک سست در بستر دریا قرار گرفته‌اند. در زیر پایه‌های این پل، از شمع‌های فلزی مسلح‌کننده توخالی به قطر و ضخامت ۲ و ۰/۰۲۵، طولی در حدود ۳۵ و فاصله مرکزی ۵ متر برای تقویت خاک سست استفاده شده است. همچنین طراحی لرزه‌ای این پل بر مبنای دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله از گسل آناتولین با بزرگی ۷/۶ مدنظر قرار گرفته است [۱۸].



شکل (۱): پروفیل مقطع طولی و پایه با شمع‌های مسلح‌کننده در پل از میت ترکیه [۱۸].

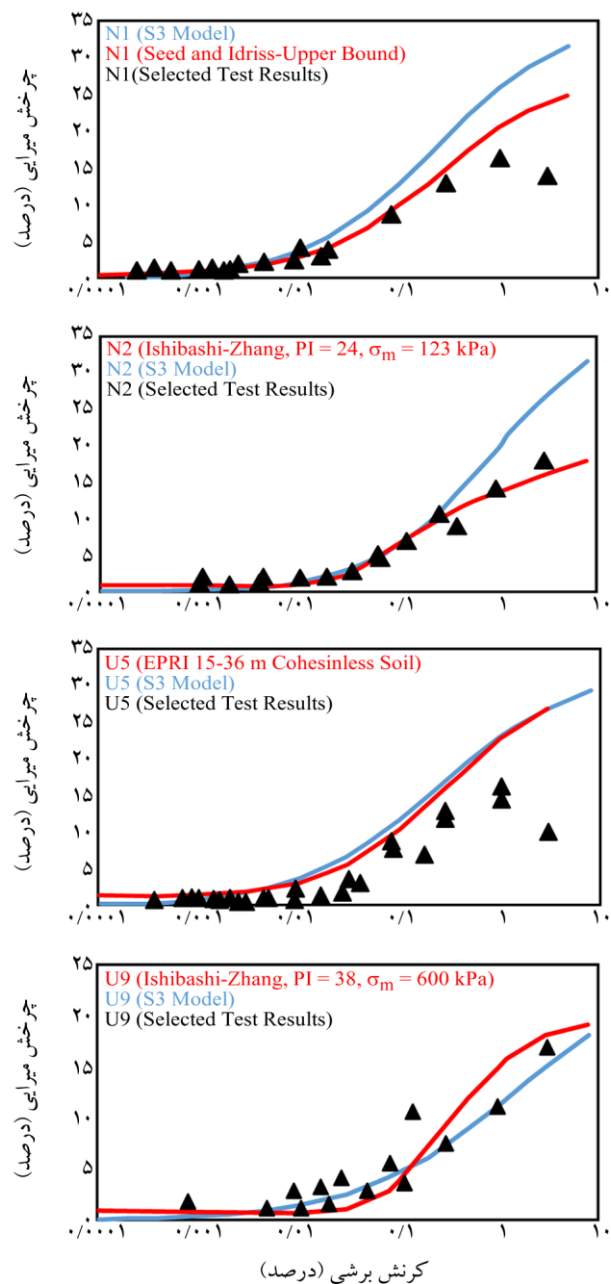
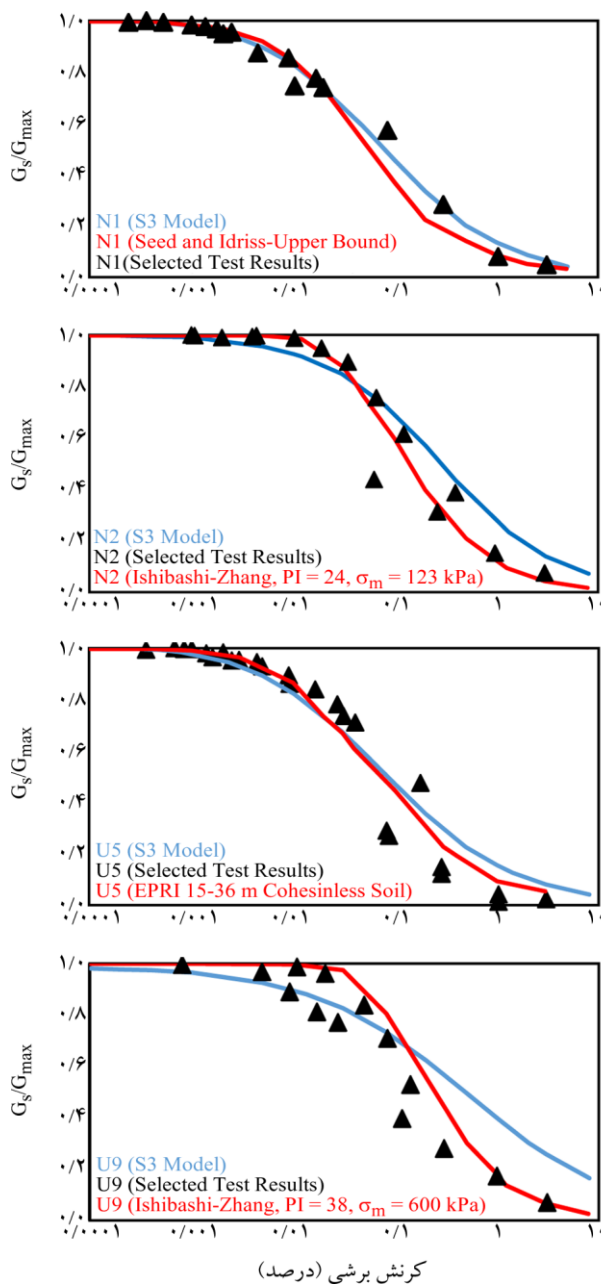
برای لایه ارتباطی شنی از رابطه رولینز [۲۱] برای مدل کاهش مدول برشی و میرایی هیستریزس استفاده شده است.

۳- مدل سازی عددی

۳-۱- مدل سازی عددی ساختگاه میدان آزاد

استفاده از مدل سازی عددی می تواند ابزار مفیدی برای درک بهتر نقش تغییر پارامترهای هندسی شمع ها در پاسخ طیف شتاب سطح زمین باشد. در این راستا، الگوریتم های عددی نظیر

برای تحلیل در نرم افزار FLAC2D، نمودارهای کاهش مدول برشی و میرایی بر مبنای مدل هیستریزس (S3) موجود در برنامه برآزش شده بر داده های آزمایشگاهی برای لایه های مختلف خاک بر مبنای تحقیقات ژانگ و همکاران [۱۸] مورد استفاده قرار گرفته است. نمودارهای منطبق شده کاهش مدول برشی و میرایی مدل هیستریزس موجود در برنامه FLAC2D بر مبنای مدل موهر-کولمب با میرایی هیستریزس هاردین-درنویچ^۵، در شکل (۳) نشان داده شده اند. همچنین در این مطالعه



شکل (۳): پارامترهای دینامیکی خاک برای لایه N1، N2، U5، U9 در پایه شمالی پل ازمیت ترکیه [۱۸].

در نزدیکی گسل شمالی آنا تولین، تاریخچه‌های زمانی شتاب بر مبنای ویژگی‌های تکنیکی منطقه، بزرگای زلزله، فاصله از گسل و شرایط ساختگاه انتخاب شده‌اند. برای این منظور از پایگاه‌های داده‌های زلزله PEER [۲۴] و STRONG-MOTION CENTER [۲۵] استفاده شده است. در این تحقیق، برای بررسی طیف پاسخ شتاب سطح زمین از هفت تاریخچه زمانی زلزله مطابق جدول (۲) استفاده شده است. مشخصات مربوط به هر رکورد از قبیل نام ایستگاه، بزرگای، فاصله رومرکزی و نوع خاک محل ثبت رکوردها، بر مبنای طبقه‌بندی آیین‌نامه اروپایی [۲۶] در جدول (۲) ارائه شده است. این تحریک‌ها برای مدل غیرخطی به کمک نرم‌افزار Seismomatch به طیف پاسخ شتاب آیین‌نامه اروپایی با PGA معادل $0.5g$ و خاک نوع B با توجه به نوع خاک منطقه منطبق و مقیاس شده^۶ است. از این هفت تاریخچه زمانی برای انجام اعتبارسنجی مدل عددی استفاده شده و سپس مطالعات پارامتریک بر مبنای تاریخچه زمانی زلزله کوبه (۱۹۹۵) انجام گرفته که در ادامه به آن اشاره شده است.

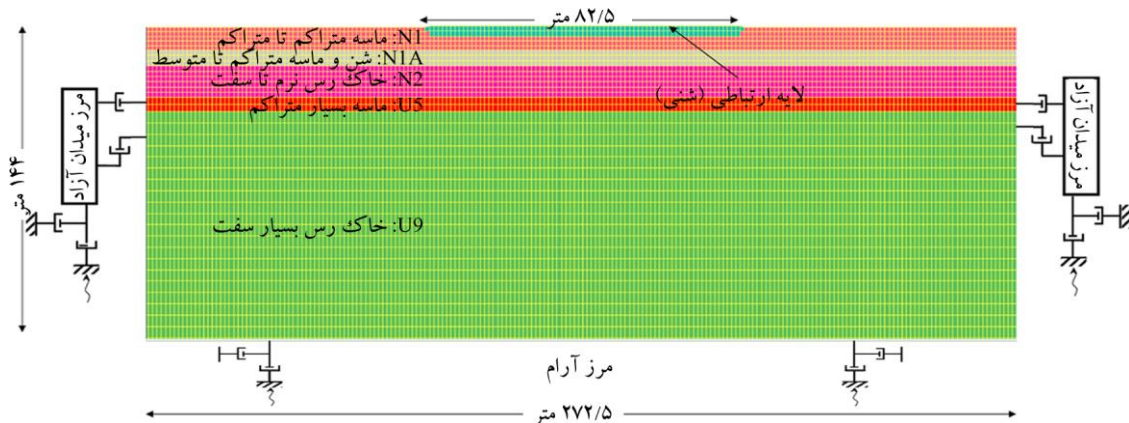
شرایط اولیه در مدل با توزیع خطی تانسور تنش و فشار آب حفره‌ای در هر زون تعریف می‌شود. در این راستا، برای تعیین شرایط مرزی در مرحله استاتیکی، سطوح تحتانی در دو جهت افقی و قائم (x,y) و سطح جانبی در جهت افقی (x) مقید می‌شوند. در ادامه به منظور ایجاد تعادل مدل قبل از اعمال بارگذاری لرزه‌ای نیروهای نامتعادل کننده، مدل مورد بررسی قرار گرفته و تعادل اولیه در آن با تنظیم شرایط مرزی و شرایط اولیه برقرار شده است.

اجزای محدود، تفاضل محدود و اجزای مرزی، بر مبنای مدل‌های رفتاری متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D به منظور مدل‌سازی عددی مدل میدان آزاد و مدل مسلح شده با شمع‌ها در ساختگاه مورد نظر بر مبنای مدل رفتاری غیرخطی الاستوپلاستیک موهر-کولمب با میرایی هیستریزس هاردین- درنویچ استفاده شده است [۲۲]. روند مدل‌سازی در این نرم‌افزار به گونه‌ای است که پس از معرفی خصوصیات لایه‌های خاک به مدل و تعیین مرزهای جانبی جاذب امواج، پاسخ لرزه‌ای ساختگاه مورد نظر به ازای تحریک‌های متفاوت به دست آمده است. به جهت جلوگیری از خطاهای عددی و دقت در شرایط انتقال موج در محیط، ابعاد المان‌های مدل (ΔL) بنا به توصیه کولیمر و لیسمر [۲۳] طوری انتخاب شده که رابطه (۱) در آنها اکتفا شود. به عبارت دیگر در حداقل طول موج امواج مهاجم، بایستی از حداقل ۸ تا ۱۰ المان استفاده نمود.

$$\Delta L \leq \frac{\lambda_{\min}}{8 \text{ to } 10} = \frac{V_{s_{\min}}}{(8 \text{ to } 10)f_{\max}} \quad (1)$$

در این رابطه، $V_{s_{\min}}$ سرعت موج برشی حداقل در محیط و f_{\max} حداکثر فرکانس موج ورودی می‌باشد.

در این راستا، ابعاد مش‌بندی در اطراف سازه اصلی ریزتر در نظر گرفته شده و برای جلوگیری از افزایش زمان تحلیل با دور شدن از سازه اصلی، ابعاد مش‌بندی به تدریج افزایش یافته است. در شکل (۴) مش‌بندی مدل میدان آزاد در نرم‌افزار FLAC2D نشان داده شده است. با توجه به مطالعات لرزه‌خیزی انجام شده در محل پل از میت ترکیه واقع در یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان و

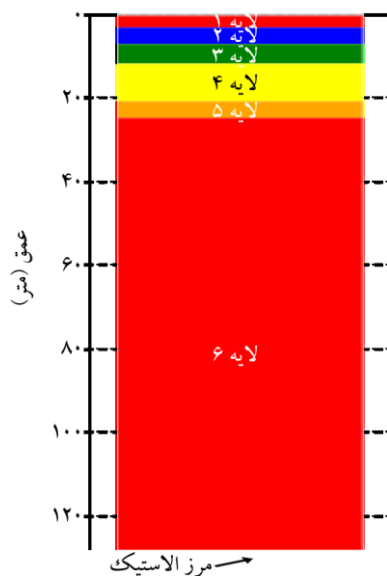


شکل (۴): هندسه مدل عددی ساختگاه به صورت میدان آزاد با کمک نرم‌افزار FLAC2D.

جدول (۲): تاریخچه‌های زمانی شتاب‌های منتخب برای انجام تحلیل‌های لرزه‌ای پاسخ ساختمان.

| زلزله | ایستگاه | بزرگای سطحی | فاصله رو مرکزی (کیلومتر) | نوع خاک آیین‌نامه اروپایی |
|------------------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------------|
| کوبه (۱۹۹۵) | Kakogawa | ۶/۹ | ۳۰/۱ | B |
| هونشو شرقی (۲۰۱۴) | Kiryuh | ۵/۶ | ۲۸/۷ | B |
| هونشو (۱۹۹۶) | Kiryuh | ۵/۸ | ۸۱/۳ | B |
| هوکایدو (۲۰۱۶) | Minamikayabe | ۶/۷ | ۱۵۴/۰ | B |
| نزدیک ساحل شرقی هونشو (۲۰۱۱) | Mito | ۶/۱ | ۷۲/۴ | B |
| نزدیک ساحل شرقی هونشو (۲۰۱۱) | Mito | ۶/۱ | ۴۷/۱ | B |
| ایواکی (۲۰۱۷) | Motegi | ۵/۹ | ۱۱۳/۰ | B |

مرزی، پاسخ تغییر مکان در مرز زیرین پس از انجام تحلیل دینامیکی دقیقاً همانی نباشد که در زلزله ورودی استفاده شده است. از این رو، ضروری است که مقدار ضریب α در رابطه (۳)، با کنترل نتایج تحلیل‌ها با مدل یک‌بعدی میدان آزاد در دو برنامه FLAC2D و DEEPSOIL [۲۷] تصدیق شود. همچنین به منظور در نظرگیری استهلاک انرژی امواج در مدل عددی، از میرایی هیستریزس مبتنی بر مدل رفتاری موهر-کولمب موجود در برنامه FLAC2D استفاده شده است. همچنین از یک میرایی رایلی معادل ۰/۲ درصد برای میرایی بخش الاستیک در نظر گرفته شده است [۲۲]. لذا، به منظور کالیبره شدن مدل یک‌بعدی میدان آزاد در برنامه FLAC2D (شکل ۴) با مدل یک‌بعدی میدان آزاد با رفتار غیرخطی در برنامه DEEPSOIL (شکل ۵)



شکل (۵): لایه‌بندی ساختمان در یک مدل یک‌بعدی به کمک نرم‌افزار DEEPSOIL [۲۴].

سپس جابه‌جایی‌های افقی و قائم اولیه برای انجام تحلیل‌های دینامیکی صفر شده است. در تحلیل دینامیکی، شرایط مرزی مقید موجب بازگشت دوباره امواج لرزه‌ای به مدل می‌شود که در نتیجه برای جلوگیری از این امر، از مرزهای میدان آزاد^۷ در مرزهای جانبی مدل استفاده می‌شود. با توجه به تأثیر مرزهای جانبی بر طیف پاسخ شتاب، بهینه‌ترین فاصله مرزهای جانبی معادل دو برابر طول بلندترین شمع مسلح کننده در مدل دوبعدی در نظر گرفته شده است. همچنین مرز تحتانی به صورت مرز آرام^۸ در نظر گرفته شده است. بارگذاری لرزه‌ای برای مرزهای آرام باید به صورت امواج تنش فشاری یا تنش برشی با استفاده از روابط (۲) و (۳) به مدل اعمال شود [۲۲].

$$\sigma_n = \alpha \rho c_p v_n \quad (۲)$$

$$\sigma_s = \alpha \rho c_s v_s \quad (۳)$$

در این روابط σ_n و σ_s به ترتیب تنش فشاری و برشی؛ c_p و c_s سرعت انتشار امواج فشاری و برشی در محیط؛ v_n و v_s تاریخچه زمانی سرعت امواج فشاری و برشی اعمالی و ρ چگالی جرمی خاک می‌باشد.

در این مطالعه به جهت استفاده از مؤلفه افقی تاریخچه‌های زمانی، تنش برشی برای مدل محاسبه و به مرز زیرین اعمال شده است. ضریب ثابت α در این روابط به منظور تصحیح اثر جذب بخشی از تنش اعمال شده توسط میراگرهای ویسکوز در مرز زیرین مدل عددی بوده که معمولاً عدد ۲ در نظر گرفته می‌شود [۲۲]. با استفاده از این مرز، مشکل انعکاس امواج در مرز پایینی برطرف شده، اما این احتمال وجود دارد که به واسطه شرایط

از مقدار میرایی هیستریزیس S3 ارائه شده در شکل (۳) استفاده شده است. در ادامه پس از کالیبره نمودن پارامترهای دخیل به ویژه برای تعریف دقیق مرز تحتانی (تعیین ضریب α در رابطه (۳)، به مدل میدان آزاد اعتبارسنجی شده در نرم‌افزار FLAC2D شمع‌های مسلح‌کننده اضافه شده‌اند.

همچنین با فعال نمودن تحریک دینامیکی و اعمال شتاب گرانشی در هنگام تحلیل، مدل تحت بار دینامیکی ناشی از شتاب گرانش قرار می‌گیرد و به علت عدم وجود میرایی، ارتعاش آن تا بی‌نهایت ادامه خواهد داشت. در این حالت با محاسبه زمان یک دور نوسان کامل سیستم، فرکانس طبیعی مدل به دست خواهد آمد [۲۲] که در این تحقیق مقدار آن برای مدل یک‌بعدی در حدود 0.6 هرتز حاصل شده است.

۳-۳- مدل سازی عددی ساختگاه به همراه شمع‌های مسلح‌کننده

به منظور شناخت رفتار شمع‌های مسلح‌کننده و بررسی تأثیر حضور آنها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، بر مبنای همان مدل میدان آزاد اعتبارسنجی شده، شمع‌های مسلح‌کننده به مدل اضافه شده است.

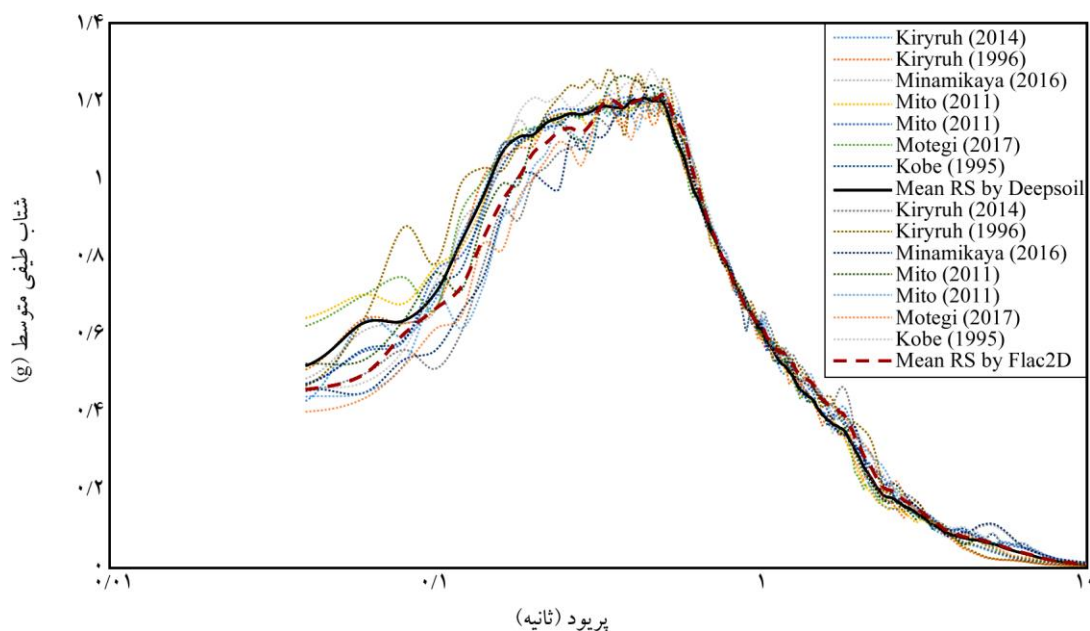
المان شمع در نرم‌افزار FLAC2D از نوع المان سازه‌ای دوبعدی شامل سه درجه آزادی (جابه‌جایی در دو جهت افقی و قائم و یک درجه چرخشی) در انتهای هر گره از المان که به صورت ترکیب دو المان تیر و کابل عمل می‌کند، در نظر گرفته شده است.

از مقدار میرایی هیستریزیس S3 ارائه شده در شکل (۳) استفاده شده است. در ادامه پس از کالیبره نمودن پارامترهای دخیل به ویژه برای تعریف دقیق مرز تحتانی (تعیین ضریب α در رابطه (۳)، به مدل میدان آزاد اعتبارسنجی شده در نرم‌افزار FLAC2D شمع‌های مسلح‌کننده اضافه شده‌اند.

همچنین با فعال نمودن تحریک دینامیکی و اعمال شتاب گرانشی در هنگام تحلیل، مدل تحت بار دینامیکی ناشی از شتاب گرانش قرار می‌گیرد و به علت عدم وجود میرایی، ارتعاش آن تا بی‌نهایت ادامه خواهد داشت. در این حالت با محاسبه زمان یک دور نوسان کامل سیستم، فرکانس طبیعی مدل به دست خواهد آمد [۲۲] که در این تحقیق مقدار آن برای مدل یک‌بعدی در حدود 0.6 هرتز حاصل شده است.

۳-۲- اعتبارسنجی مدل عددی

برای بررسی صحت مدل عددی، رفتار مصالح و همچنین شرایط مرزی در تحلیل‌های پاسخ زمین، صحت‌سنجی مدل عددی امری ضروری می‌باشد. برای این منظور، هفت تحریک ذکر شده در جدول (۲) به مدل عددی میدان آزاد با نرم‌افزار FLAC2D (شکل ۴) و مدل یک‌بعدی میدان آزاد در نرم‌افزار



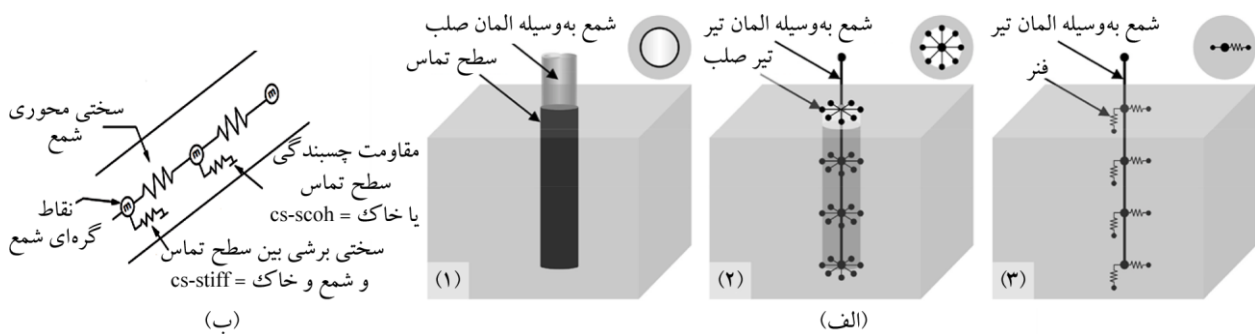
شکل (۶): متوسط پاسخ‌های شتاب طیفی مقطع ستون یک‌بعدی در FLAC2D و مقایسه متوسط پاسخ‌ها با مدل یک‌بعدی DEEPSOIL برای هفت تحریک ورودی.

شکل (۸) مدل عددی سیستم پی-شمع در برنامه FLAC2D بر مبنای شکل (۹) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت لایه ارتباطی شنی برابر ۳ متر بوده و دارای عرض ۸۲/۵ متر با سرعت موج برشی ۱۹۶ متر بر ثانیه، زاویه اصطکاک داخلی برابر با ۴۵ درجه مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است. طول شمع‌های فولادی استفاده شده در مدل عددی بر مبنای مطالعه موردی (پل از میت) معادل ۳۵ متر، قطر ۲ متر، فاصله مرکز به مرکز ۵ متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر لحاظ شده است. اندازه المان‌ها با نزدیک شدن به سیستم شمع-خاک، متراکم‌تر بوده (۱ متری) و با دور شدن، از تراکم آن کاسته می‌شود. همچنین بار وارده از سازه‌های فوقانی بر سیستم پی-شمع مسلح‌کننده برابر ۸۱۰ مگانیوتن می‌باشد [۱۸]. لازم به یادآوری است که مدل عددی مطالعه موردی (پل از میت) به‌عنوان مدل مبنا به منظور انجام مطالعات پارامتریک در نظر گرفته شده است.

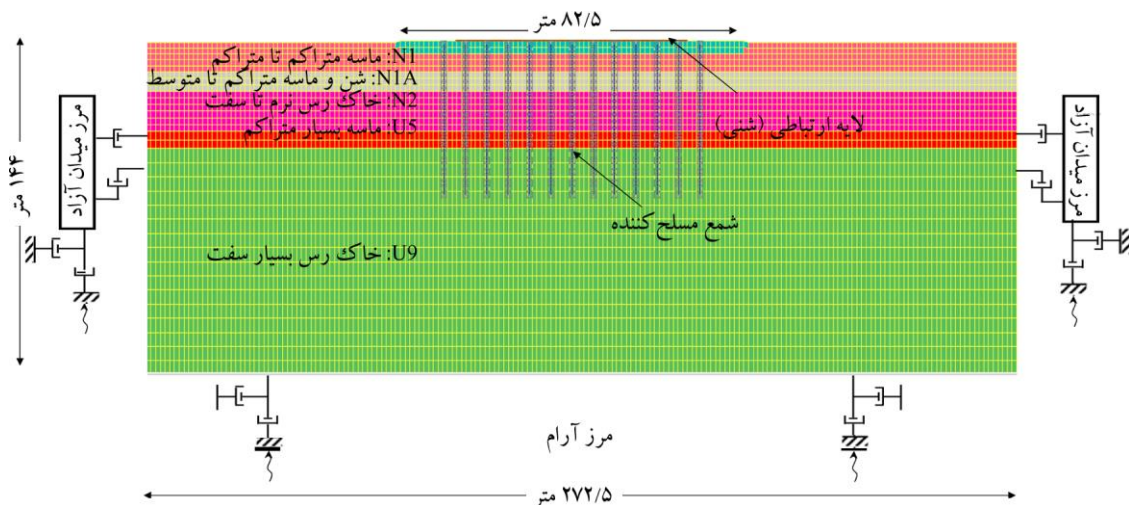
همچنین اندرکنش بین خاک و شمع با استفاده از فنرهای برشی و نرمال شبیه‌سازی شده است. این فنرها، رابط‌های غیرخطی می‌باشند که نیروها و امواج را بین المان‌های شمع و خاک در گره‌های مشترک مرتبط می‌سازند. شکل (۷) مکانیسم نحوه مدلسازی شمع و رفتار فنرهای برشی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، فنرهای نرمال تأثیر فشرده شدن خاک اطراف شمع را نشان می‌دهند. سختی فنرهای برشی و نرمال را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود. همچنین، شمع‌ها المان سه‌بعدی می‌باشند که در نرم‌افزار FLAC2D با در نظر گرفتن فاصله بین دو شمع (S)، مدل‌سازی این المان انجام می‌گیرد [۲۲، ۲۸].

$$k_{sn} = 10 \times \left[\frac{K + 4G/3}{\Delta Z_{min}} \right] \quad (4)$$

در این رابطه، k_{sn} سختی فنرهای نرمال و برشی، K مدول حجمی (بالک)، G مدول برشی و ΔZ_{min} حداقل بعد المان است.



شکل (۷): (الف) مکانیسم مدل‌سازی شمع به‌صورت المان کابل و المان تیر و (ب) فنرهای برشی و نرمال در المان شمع مدل عددی [۲۲، ۲۸].



شکل (۸): مدل عددی دوبعدی ساختگاه با حضور شمع‌های مسلح‌کننده در نرم‌افزار FLAC2D.

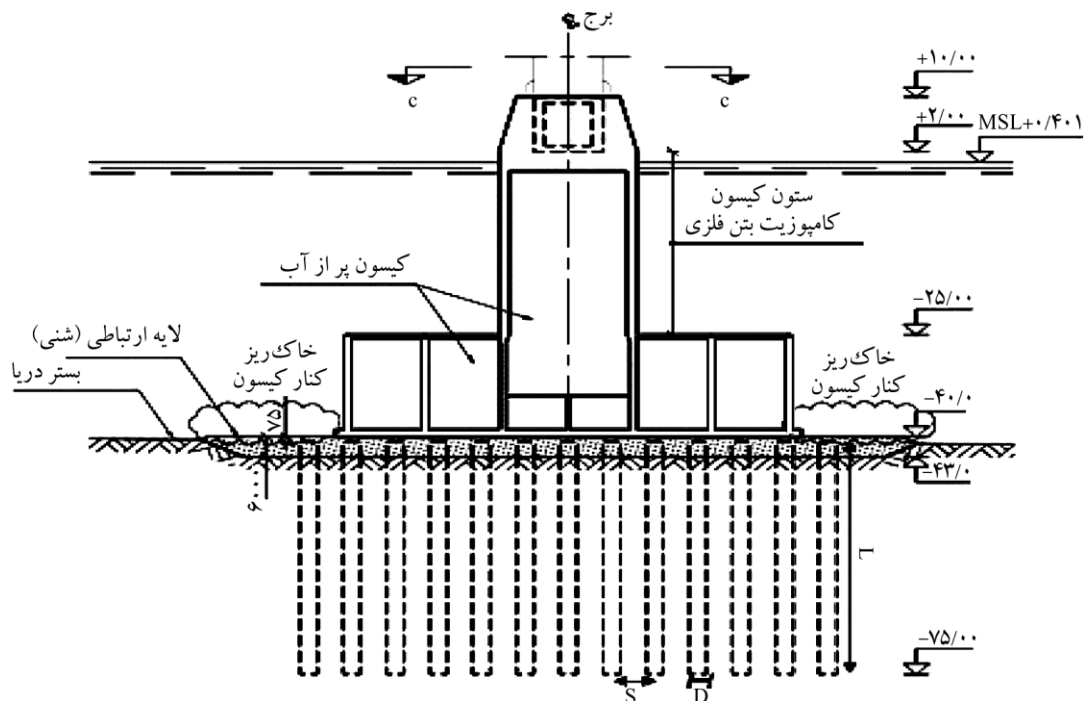
جدول (۳): محدوده پارامترهای بی‌بعد در نظر گرفته شده در مطالعات عددی پارامتریک.

| قطر مقطع شمع (متر) D | L/D | S/D | نسبت سربار نسبت به سربار در مدل مبنا $\bar{q} = q / q_{final}$ |
|----------------------------|------|-----|--|
| ۱ | ۲۵ | ۵ | - |
| | ۳۵ | ۶ | |
| | ۴۰ | ۸ | |
| | ۴۵ | | |
| ۱/۵ | ۲۳/۳ | ۳/۵ | - |
| | | ۵/۳ | |
| ۲ | ۱۵ | ۲/۵ | ۱ |
| | ۱۷/۵ | ۳ | ۲ |
| | ۲۰ | ۴ | ۳ |
| ۲/۵ | ۶ | ۱/۶ | - |
| | ۸ | | |
| | ۱۴ | ۲/۴ | |
| | ۱۸ | ۳/۲ | |
| ۳ | ۵ | ۲ | - |
| | ۶/۷ | | |
| | ۱۰ | ۲/۷ | |
| | ۱۳/۳ | | |

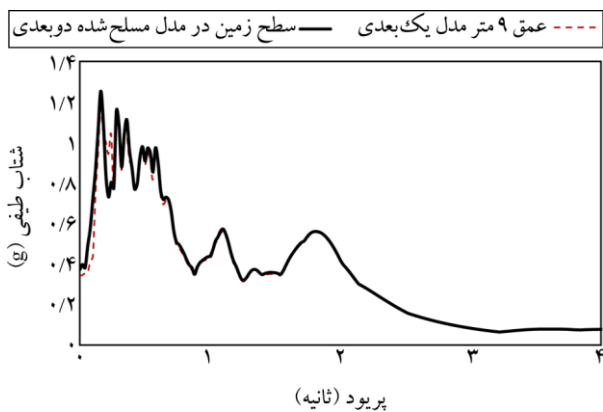
به‌طور کلی، طیف پاسخ شتاب سطح زمین در یک ساختگاه نه تنها تحت تأثیر ویژگی‌ها و ضخامت لایه‌های خاک بوده، بلکه متأثر از حضور شمع‌های مسلح‌کننده نیز می‌باشد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که مشخصات شمع‌ها و تعداد آنها در این پاسخ‌ها تأثیر متفاوتی داشته است [۲۹]. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است L طول شمع، S فاصله بین شمع‌ها و D قطر شمع‌های مسلح‌کننده بوده که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است.

مطالعات پارامتریک انجام شده بر اساس پارامترهای بی‌بعد تغییرات نسبت طول به قطر (L/D)، نسبت فواصل به قطر (S/D) و تغییرات نسبت سربار وارده به سربار اعمالی در مدل مبنا ($\bar{q} = q / q_{final}$) مطابق جدول (۳) انجام شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور انجام مطالعات پارامتریک از زلزله کوبه ۱۹۹۵ با مقدار PGA معادل ۰/۵g به‌صورت تنش برشی استفاده شده و در مدل دوبعدی اعمال شده است.

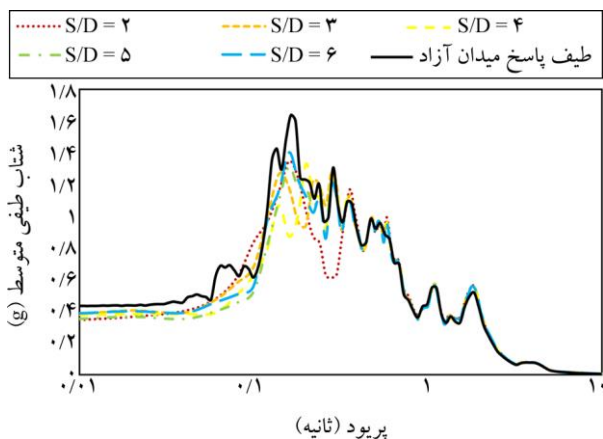
بر مبنای مطالعات پارامتریک انجام شده، عمق تأثیر شمع‌های مسلح‌کننده با مقایسه طیف پاسخ شتاب سطح زمین مدل دوبعدی با شمع‌های تقویت‌کننده با طیف پاسخ شتاب مدل میدان آزاد بدون حضور شمع‌های مسلح‌کننده، محاسبه می‌شود (شکل ۱۰).



شکل (۹): هندسه ساختگاه به همراه شمع‌های مسلح‌کننده در پایه برج شمالی پل ازمیت ترکیه به‌عنوان مدل مبنا [۱۸].

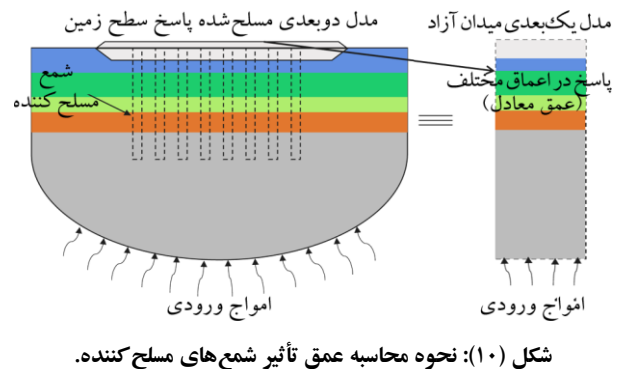


شکل (۱۱): مثالی از عمق تأثیر شمع‌های مسلح‌کننده در ساختمان پل ازبیت ترکیه با $S/D = 2/5$.



شکل (۱۲): طیف پاسخ شتاب برای مدل یک‌بعدي میدان آزاد در سطح زمین و تغییرات نسبت S/D بر طیف پاسخ شتاب در مدل دوبعدی سیستم پی-شمع مسلح‌کننده.

در شکل (۱۳)، نتایج حاصل از تأثیر تغییرات S/D در برابر عمق تأثیر ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها، سختی سیستم خاک-شمع کمتر شده و در نتیجه پاسخ شتاب لرزه‌ای بر روی سطح زمین بیشتر می‌شود که موجب کاهش عمق تأثیر خواهد شد. این کاهش از نسبت S/D بزرگ‌تر از ۵ به مقدار ثابتی رسیده است. بالعکس با فرض ثابت بودن قطر، مشاهده می‌شود که با کاهش فاصله بین شمع‌ها و یا به عبارتی با افزایش تعداد شمع‌ها، سختی سیستم افزایش یافته و این تغییرات سختی باعث ایجاد اختلاف در طیف پاسخ شتاب در نسبت S/D ‌های مختلف می‌شود. در واقع، با افزایش سختی سیستم شمع-خاک اثر اندرکنش سینماتیکی^{۱۰} افزایش یافته و حرکت ورودی جدیدی به پایه پل وارد می‌شود



شکل (۱۰): نحوه محاسبه عمق تأثیر شمع‌های مسلح‌کننده.

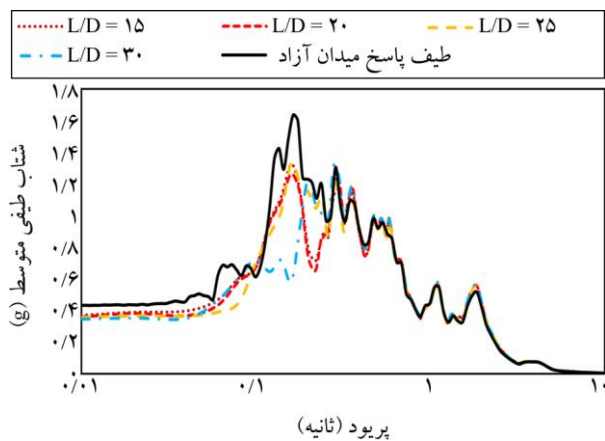
در واقع، با توجه به اینکه در مطالعات عرف لرزه‌خیزی، مبنای اغلب تحلیل‌های پاسخ ساختگاه، مدل یک‌بعدي میدان آزاد است، لذا در این تحقیق با معرفی عمق تأثیر که نشان‌دهنده‌ی رابطه بین پاسخ مدل دوبعدی در سطح زمین با عمق معادل در مدل یک‌بعدي میدان آزاد می‌باشد، ارتباط بین عمق معادل یک‌بعدي برای مدل‌های مختلف دوبعدی مسلح‌شده با شمع، به‌منظور کاربردی نمودن نتایج ارائه شده است.

به‌عنوان مثال مطابق شکل (۱۱)، طیف پاسخ معادل یک‌مدل دوبعدی مسلح‌شده با شمع برای نسبت $S/D = 2/5$ (مدل مبنای پل ازبیت) در مقایسه با مدل یک‌بعدي میدان آزاد بدون حضور شمع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق معادل یک‌بعدي یا همان عمق تأثیر در عمق ۹ متری سطح زمین در مدل میدان آزاد واقع شده است.

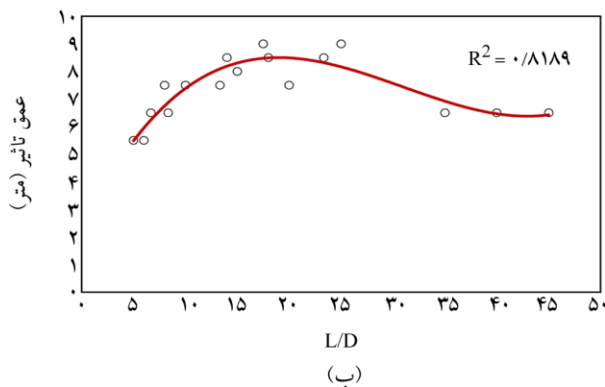
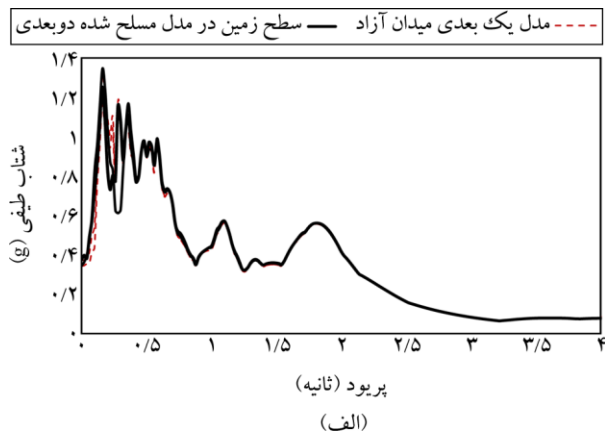
۴- بررسی نتایج مطالعات پارامتریک

۴-۱- اثر نسبت S/D بر عمق تأثیر

یکی از مسائل مهم در طراحی سیستم‌های پی-شمع مسلح‌کننده، تعیین فاصله مناسب بین شمع‌ها و اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌باشد. لازم به یادآوری است که برای به دست آوردن عمق تأثیر، طیف پاسخ شتاب سطح زمین مدل دوبعدی مسلح‌شده توسط شمع‌ها با پاسخ شتاب طیفی اعماق مختلف مدل یک‌بعدي میدان آزاد مقایسه شده است (شکل ۱۲). در این بخش به بررسی عمق تأثیر با تغییرات نسبت فاصله بین شمع‌های مسلح‌کننده به قطر آنها (S/D) و طول شمع ثابت در حدود ۳۵ متر بر پایه مدل مینا، پرداخته شده است.

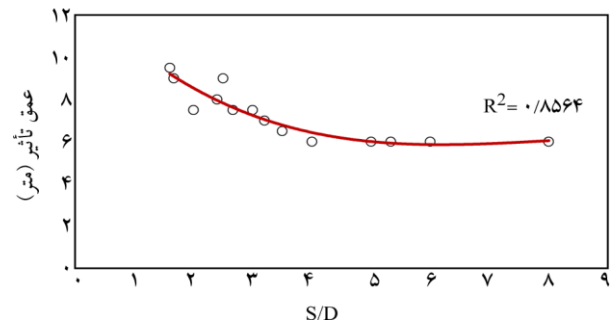


شکل (۱۳): طیف پاسخ شتاب برای مدل یک‌بعدی میدان آزاد در سطح زمین و تغییرات نسبت L/D بر طیف پاسخ شتاب در مدل دوبعدی سیستم خاک-شمع مسلح‌کننده.



شکل (۱۴): مقایسه طیف پاسخ شتاب برای مدل یک‌بعدی میدان آزاد در عمق ۷ متری و مدل دوبعدی سیستم پی-شمع مسلح‌کننده ($L/D=35$) در سطح زمین و (ب) عمق تأثیر در سیستم شمع‌های مسلح‌کننده در برابر تغییرات نسبت L/D برای ساختگاه پل ازبیت ترکیه.

همان‌طور که در شکل (۱۵-ب) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت L/D سختی سیستم خاک-شمع مسلح‌کننده افزایش یافته که افزایش این سختی موجب کاهش موج وارده به پی



شکل (۱۳): عمق تأثیر شمع‌های مسلح‌کننده تحت تأثیر تغییرات نسبت S/D برای مدل مبنا به همراه خط برازش شده

که از پاسخ میدان آزاد در سطح زمین متفاوت است. برای طراحی مناسب پایه‌های پل، استفاده از نسبت S/D مناسب و بهینه امری بسیاری مهم می‌باشد که با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از نسبت S/D در حدود $1/5$ تا $3/5$ مقدار مناسبی برای طراحی سیستم‌های پی-شمع مسلح‌کننده توصیه می‌شود. لازم به ذکر است در پروژه پل ازبیت ترکیه نیز از نسبت S/D برابر $2/5$ استفاده شده است.

همچنین بر مبنای نتایج به دست آمده از شکل (۱۳) برای خاک مورد مطالعه ساختگاه رابطه پیشنهادی (۵) ارائه شده است:

$$D_{\text{eff}} = -0.0161 \left(\frac{S}{D} \right)^3 + 0.3842 \left(\frac{S}{D} \right)^2 - 2.9064 \left(\frac{S}{D} \right) + 12.935 \quad 1.6 \leq \frac{S}{D} \leq 8.0 \quad (5)$$

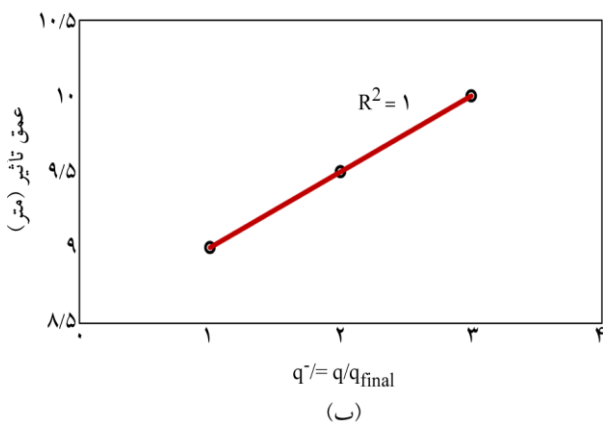
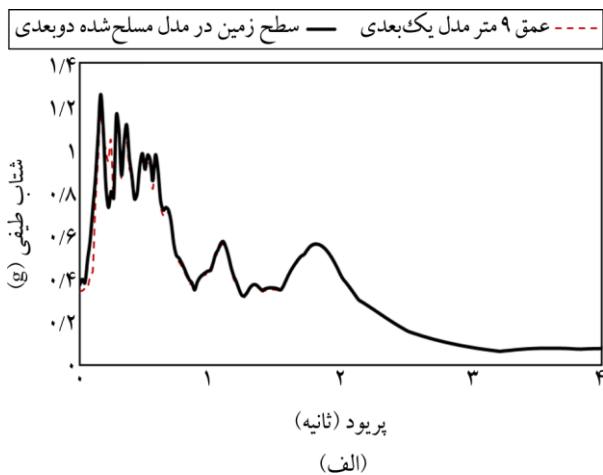
۴-۲- اثر نسبت L/D بر عمق تأثیر

در این بخش به تأثیر نسبت طول به قطر شمع‌های مسلح‌کننده (L/D)، بر عمق تأثیر پرداخته شده است. مطابق شکل (۱۴) طیف پاسخ شتاب‌های طیفی مدل دوبعدی برای نسبت‌های مختلف (L/D) به همراه طیف پاسخ میدان آزاد نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۵-الف) به عنوان نمونه عمق تأثیر شمع‌های مسلح‌کننده برای نسبت L/D برابر ۳۵ که در آن عمق معادل مدل میدان آزاد (بدون حضور شمع) در حدود ۷ متر برآورده شده، نشان داده شده است. نتایج عمق تأثیر به دست آمده برای نسبت طول به قطرهای مختلف شمع بر مبنای فواصل ثابت ۵ متری بین شمع‌ها در شکل (۱۵-ب) ارائه شده است.

خواهد شد. به عبارت دیگر در اثر اندرکنش سینماتیکی ایجاد شده در سیستم، حرکت ورودی جدیدی به پایه پل وارد خواهد شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدا عمق تأثیر با افزایش L/D افزایش یافته تا به مقدار حداکثر خود برسد و سپس میزان آن کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر L/D عمق تأثیر به مقدار ثابتی خواهد رسید. در واقع، با افزایش طول شمع‌ها، مقدار طولی از شمع‌ها که در لایه سخت خاک قرار دارد افزایش یافته و در نتیجه تغییر طیف پاسخ شتاب دریافتی در سطح زمین نیز کمتر می‌شود. این نتیجه در تحقیقات انجام شده توسط فلاح‌زاده و همکاران [۲۹] و خیمنز [۳۰] نیز مشاهده شده است. به عبارت دیگر، افزایش طیف پاسخ شتاب با افزایش نسبت L/D بزرگ‌تر از ۳۵ تأثیرپذیری چندانی از طول شمع نداشته و مقدار آن ثابت می‌شود. استفاده از نسبت L/D در بازه ۱۵ تا ۳۰ در پروژه‌ها با پی-شمع‌های مسلح‌کننده توصیه می‌شود. لازم به ذکر است که در پروژه پل ازमित ترکیه از نسبت L/D برابر با ۱۷/۵ استفاده شده است که بر طبق نتایج این تحقیق عمق تأثیر به دست آمده معادل ۹ متر می‌باشد.

برای نسبت سربارهای مختلف وارده بر ساختگاه به سربار نهایی وارده از سازه فوقانی اجرا شده در برج شمالی پل ازमित ترکیه بر مبنای فواصل ثابت ۵ متری بین شمع‌ها، و طول ثابت ۳۵ متر و قطر ثابت ۲ متری شمع‌ها در شکل (۱۶-ب) ارائه شده است. مطابق شکل (۱۶-ب) با افزایش نسبت \bar{q} که موجب افزایش تنش و افزایش سختی کل سیستم می‌شود، عمق تأثیر شمع‌های مسلح‌کننده به صورت خطی افزایش می‌یابد. این نتیجه در تحقیقات انجام شده توسط خیمنز [۳۰] نیز مشاهده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه بین مقدار عمق تأثیر با نسبت سربار وارده (\bar{q}) رابطه‌ای خطی به شکل رابطه پیشنهادی زیر است.

$$D_{\text{eff}} = 0.5763(\bar{q}) + 8.313 \quad 0.5 \leq \bar{q} \leq 3 \quad (7)$$



همچنین رابطه (۶) برای محاسبه رابطه عمق تأثیر با نسبت طول به قطر شمع‌های مسلح‌کننده یعنی نسبت (L/D) پیشنهاد شده است.

همچنین رابطه (۶) برای محاسبه رابطه عمق تأثیر با نسبت طول به قطر شمع‌های مسلح‌کننده یعنی نسبت (L/D) پیشنهاد شده است.

$$D_{\text{eff}} = 0.0003 \left(\frac{L}{D} \right)^3 + 0.0287 \left(\frac{L}{D} \right)^2 - \quad (6)$$

$$0.7557 \left(\frac{L}{D} \right)^3 + 2.3853 \quad 5 \leq \frac{L}{D} \leq 45$$

۳-۴ اثر نسبت سربار وارده بر پی ($\bar{q} = q/q_{\text{final}}$) بر عمق تأثیر

در این بخش، تأثیر تغییرات نسبت سربار (\bar{q})، یعنی نسبت سربارهای مختلف وارده بر ساختگاه (q) به سربار وارده از سازه فوقانی اجرا شده به عنوان سربار نهایی یا مینا (q_{final}) بر عمق تأثیر شمع‌های مسلح‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال در شکل (۱۶-الف) مقایسه طیف‌های منطبق شده شمع‌های مسلح‌کننده برای نسبت \bar{q} برابر ۱ که در آن عمق تأثیر معادل ۹ متر برآورده شده، نشان داده شده است. نتایج به دست آمده

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعات متداول لرزه‌خیزی برای سازه‌های مهم، اغلب مطالعات تحلیل لرزه‌ای ساختگاه بر مبنای تحلیل‌های یک‌بعدی انجام می‌شود و از اثر المان‌های مدفون نظیر شمع‌های مسلح‌کننده در این مطالعات صرف‌نظر می‌شود. در صورتی که وجود شمع‌های مسلح‌کننده در زیر فونداسیون سازه‌ها می‌تواند موجب افزایش سختی خاک و به دنبال آن کاهش اثرات پاسخ لرزه‌ای زمین و سازه در اثر ایجاد اندرکنش سینماتیکی شود. این تحقیق به بررسی اثر عوامل مختلف بر عمق تأثیر شمع‌ها و تحلیل نتایج حاصل از حضور شمع‌های مسلح‌کننده بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بر مبنای ساختگاه پایه پل از میت ترکیه به‌عنوان مدل مبنا و مطالعه موردی پرداخته است. این بررسی شامل تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی شمع‌های تقویت‌کننده نظیر قطر، طول و فاصله بین آنها و سرباره وارده به‌صورت پارامترهای بی‌بعد بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌باشد. همچنین به‌منظور کاربردی نمودن نتایج، عمق معادل مدل یک‌بعدی میدان آزاد (عمق تأثیر) برای مدل دوبعدی پی-شمع مسلح‌کننده به‌منظور استفاده در مطالعات لرزه‌خیزی پیشنهاد شده است. برای این منظور، مدل‌سازی عددی با کمک نرم‌افزار FLAC2D به روش غیرخطی با مدل هیستریزاس انجام شده است. لازم به ذکر است که عمق تأثیر با مقایسه طیف پاسخ شتاب سطح زمین مدل دوبعدی با شمع‌های مسلح‌شده با عمق معادل طیف پاسخ شتاب مدل میدان آزاد بدون حضور شمع به دست آمده است. در این راستا، روابط تجربی برای در نظرگیری تأثیر هر کدام از پارامترهای یاد شده بر عمق تأثیر ارائه شده است. از جمله مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. با افزایش نسبت L/D که نشان‌دهنده افزایش نسبت طول به قطر شمع‌های مسلح‌کننده می‌باشد، مشاهده می‌شود که عمق تأثیر افزایش می‌یابد. عمق تأثیر با افزایش L/D افزایش یافته تا به مقدار بیشینه خود برسد و سپس کاهش یافته و به مقدار ثابتی رسیده است. به عبارت دیگر استفاده از نسبت L/D در بازه ۱۵ تا ۳۰ در پروژه‌های اجرایی با سیستم پی-شمع

مسلح‌کننده توصیه می‌شود.

۲. با افزایش فاصله بین شمع‌ها، سختی سیستم کمتر شده و پاسخ شتاب لرزه‌ای بر روی سطح زمین کاهش می‌یابد و این کاهش، از نسبت S/D بزرگ‌تر از ۵ به میزان ثابتی رسیده است. با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از نسبت S/D در بازه ۱/۵ تا ۳/۵ در طراحی سیستم پی-شمع مسلح‌شده توصیه می‌شود. به بیان دیگر، با کاهش نسبت S/D ، اثر اندرکنش سینماتیکی افزایش یافته و حرکت ورودی جدیدی به پایه پل وارد می‌شود که از پاسخ میدان آزاد در سطح زمین متفاوت است.

۳. با افزایش نسبت سرباره وارده (\bar{q}) بر سیستم پی-شمع مسلح‌شده، تنش در خاک افزایش یافته که می‌تواند منجر به افزایش عمق تأثیر شود.

در انتها بایستی خاطر نشان نمود که بهسازی خاک با استفاده از شمع‌های مسلح‌کننده می‌تواند در اثر اندرکنش سینماتیکی، حرکت ورودی جدیدی را به فونداسیون متفاوت از پاسخ سطح زمین در میدان آزاد، اعمال نمایند. این اندرکنش باعث افزایش عمق تأثیر در مدل میدان آزاد معادل، می‌شود که می‌تواند موجب کاهش پاسخ‌های روسازه (ساختمان‌ها یا پل‌ها و غیره) گردد. لذا استفاده از این نوع شمع‌ها به علت داشتن سختی بیشتر نسبت به روش‌های معمول بهسازی خاک نظیر ستون‌های سنگی یا اختلاط عمیق خاک و غیره، می‌تواند به‌منظور طراحی بهینه سازه‌های واقع بر خاک‌های سست یا نرم اشباع مؤثر باشند.

مراجع

1. Lam, I.P., Law, H.K., and Martin, G.R. (2007) *Bridge Foundations: Modeling Large Pile Groups and Caissons for Seismic Design (No. MCEER-07-0018)*.
2. Simon, B. and Schlosser, F. (2006) Soil reinforcement by vertical stiff inclusions in France. *In Symp. on Rigid Inclusions in Difficult Subsoils Conditions*. Mexican Society of Soil Mechanics. UNAM Mexico.
3. Barchard, J. (2002) *Centrifuge Modeling of Piled*

- B.G.J. (2002) Widening of Road N247 founded on a geogrid reinforced mattress on piles. *In Proc. 7th Int. Conf. on Geosynthetics*, Nice, France: Swets and Zeitlinger, 369-372.
13. Briançon, L., Dias, D., and Simon, C. (2015) Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions–reinforced industrial building. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(10), 1592-1604.
 14. Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, Inc.
 15. Mayoral, J., Romo, M., Cirion, A., and Paulin, J. (2006) Effect of layered clay deposits on the seismic behavior of a rigid inclusion. *In Proceedings of the symposium on rigid inclusions in difficult subsoil conditions*, ISSMGE TC36, Sociedad Mexican de Mecanica de Suelos, 11-12.
 16. Rangel-Nunez, J., Shelley, E.O., Aguirre, J., and Razo, E.I. (2006) A parametric study of the factors involved in the dynamic response of soft soil deposits when rigid inclusions are used as a foundation solution. *In Proceedings of the symposium on rigid inclusions in difficult subsoil conditions*. ISSMGE TC36, Sociedad Mexican de Mecanica de Suelos, 11-12.
 17. Biesiadecki, G.L., Dobry, R., Leventis, G.E., and Peck, R.B. (2004) *Rion–Antirion Bridge Foundations: A Blend of Design and Construction Innovation*.
 18. Zhang, Y., Yao, S., and Christie, S.R. (2013) Non-linear and equivalent linear site response analysis for the Izmit Bay Bridge. *In Proc. of the 3rd International FLAC/DEM Symposium*.
 19. Huang, D., Wang, G., and Jin, F. (2020) Effectiveness of pile reinforcement in liquefied ground. *Journal of Earthquake Engineering*, **24**(8), 1222-1244.
 20. Lyngs, J.H., Kasper, T., and Bertelsen, K.S. (2013) Modeling of soil-structure interaction for seismic analyses of the Izmit Bay Bridge. *In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris: [sn].
 21. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B., and III, *Embankments on Soft Soils*. Master of Science of Engineering Thesis, Univ. New Brunswick, p. 221.
 4. Van Eekelen, S.J., Bezuijen, A., and Oung, O. (2003) Arching in piled embankments; experiments and design calculations. *In BGA International Conference on Foundations: Innovations, Observations, Design and Practice*. Proceedings of the international conference organised by British Geotechnical Association and held in Dundee, Scotland, 885-894.
 5. Bergdahl, U., Lingfors, R., and Nordstrand, P. (1979) *The Mechanics of Piled Embankments*. Swedish Geotechnical Institute, **SG3-79**, 310-320.
 6. Kempfert, H.G., Zaeske, D., and Alexiew, D. (1999) Interactions in reinforced bearing layers over partially supported underground. *In Proc. of the 12th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (12th ECSMGE)*, Amsterdam, Pays-Bas. Rotterdam: Balkema, **3**, 1527-1532.
 7. Ellis, E.A. and Aslam, R. (2009a) Arching in piled embankments: comparison of centrifuge tests and predictive methods-part 1 of 2. *Ground Engineering*, **42**, 34-38.
 8. Ellis, E.A. and Aslam, R. (2009b) Arching in piled embankments: comparison of centrifuge tests and predictive methods-part 2 of 2. *Ground Engineering*, **42**, 28-31.
 9. Pérez, R.G. and Melentijevic, S. (2015) Comparative analysis of analytical and numerical calculation methods for soil improvement by rigid inclusions. *15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1859-1866.
 10. Quigley, P., O'Malley, J., and Rodgers, M. (2003) Performance of a trial embankment constructed on soft compressible estuarine deposits at Shannon, Ireland. In: Vermeer P.A., Schweiger H.
 11. Karstunen, M. and Cudny, M. Eds. (2003) *Proc. of the Int. Workshop on Geotechnics of Soft Soils - Theory and Practice*, 17-19 September 2003, Noordwijkerhout, Pays-Bas. Essen: Verlag Glückauf, 619-624.
 12. Habib, H.A.A., Brugman, M.H.A., and Uijting,

واژه‌نامه

- | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|---|
| Inclusion Piles | ۱- شمع‌های مسلح (تقویت‌کننده) | W.D.D. (1998) Shear modulus and damping relationships for gravels. <i>Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering</i> , 124 (5), 396-405. |
| Seismic Hazard Studies | ۲- مطالعات لرزه‌خیزی | 22. Itasca, FLAC2D (2011) <i>Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2-Dimensions, Version 7.0, User Manual</i> . Itasca, Minnesota. |
| Free-Field | ۳- میدان آزاد | 23. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969) Finite Dynamic Model for Infinite Media. <i>Journal of Engineering Mechanics Division</i> , 95 , 859-878. |
| Anatolian Fault | ۴- گسل آناتولین | 24. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER (2011) <i>User's Manual for the PEER Ground Motions Database Web Application</i> . The Peer Center, University of California, Berkeley (CA), http://peer.berkeley.edu/peer ground motion database/site . |
| Harden-Drnevich Hysteresis Damping | ۵- میرایی هیستریزس هاردین - درنویچ | 25. Center for Engineering Strong Motion Data. <i>US Geological Survey and the California Geological Survey</i> . https://strongmotioncenter.org/vdc/scripts/adv_search.plx/site . |
| Matched and Scaled | ۶- منطبق و مقیاس شده | 26. Pinto, P.E. (2005) <i>The Eurocode 8-Part 3: the New European Code for the Seismic Assessment of Existing Structures</i> . |
| Free-field Boundary | ۷- مرز میدان آزاد | 27. Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Ilhan, O., Groholski, D., Phillips, C., and Park, D. (2016) <i>DEEPSOIL 6.1, User Manual</i> . University of Illinois at Urbana-Champaign: Springfield, IL, USA. |
| Quiet Boundary | ۸- مرز آرام | 28. Tran, N.X., Bong, T., Yoo, B.-S., and Kim, S.-R. (2021) Evaluation of the soil-pile interface properties in the lateral direction for seismic analysis in sand. <i>Soil Dynamics and Earthquake Engineering Journal</i> , 140 , 106473. |
| 1D Equivalent Column | ۹- ستون معادل یک بعدی | 29. Fallahzadeh, M., Jafarian, Y., and Haddad, A. (2018) Three-dimensional modeling for seismic response of pile-raft in saturated sand to investigate local site effect. <i>Modares Civil Engineering Journal</i> , 18 (4), 187-200. |
| Kinematic Interaction | ۱۰- اندرکنش سینماتیکی | 30. Jimenez, G.A.L. (2019) <i>Static and Dynamic Behaviour of Pile Supported Structures in Soft Soil</i> . Doctoral dissertation, University Grenoble Alpes. |

Effect of Inclusion Piles on Mitigation of Seismic Surface Ground Motion

Hamid Alielahi^{1*} and Arian Ghanbari Birgani²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University Zanjan, Iran, *Corresponding Author, email: h.alielahi@iauz.ac.ir
2. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Science and Culture University, Tehran, Iran

The need to construct structures on soft and unstable soils due to the appropriate technical and economic conditions has led to the development of various soil remediation methods. Moreover, the experience obtained from recent earthquakes has indicated the influence of sites' stiffness on the surface seismic ground response. One of the ways to increase the stiffness to improve the soil, especially in soft soils, is to employ inclusion piles. These types of piles can be used at the bridge's piers to reduce the seismic response of the aboveground structures. In this regard, the role of the geometry characteristics of the inclusion piles can be significant. This paper investigates the effect of changes in the geometric parameters of inclusion piles such as diameter, length, the distance between them, and surcharge on the ground seismic response based on the offshore Turkish Izmit Bridge as a case study and base model. The effective depth was obtained by comparing the ground response spectrum of the two-dimensional model with inclusion piles using FLAC2D software based on the nonlinear hysteresis model, with the depth equivalent to the acceleration response spectrum of the free-field model. The geotechnical subsurface conditions at the North Tower Izmir bay bridge consist of 10 meters of loose to medium dense sand layers with silt, underlain by 127 meters of dense sand and hard sand clay. Bedrock lies approximately 144 meters below the mudline datum. The 1D responses obtained from the FLAC 2D and DEEPSOIL 1D software have been compared using the nonlinear soil behavior to verify the numerical modeling results. Then, with the calibration of soil parameters and lateral and bottom boundaries, inclusion piles have been added to the validated free-field model in FLAC2D software.

In this study, the 2D modeling process includes introducing soil layers' characteristics and determining the lateral free-field boundaries and the quiet boundary as the bottom boundary subjected to the seven earthquake excitations is performed. The inclusion pile was modeled using the beam and cable combine elements in the FLAC2D. Besides, inclusion piles are two-dimensional elements with 3 degrees of freedom (two displacements and one rotation) at each end node. Piles interact with the FLAC grid via shear and normal coupling springs.

The obtained results indicated that by increasing the ratio of distance to the diameter of inclusion piles (S/D), the effective depth decreases due to reducing the stiffness of the inclusion pile system, and after reaching a ratio of 5, it has reached a constant value. In other words, with increasing stiffness of the soil-pile system, the effect of kinematic interaction on the soil-pile system increases. Moreover, by increasing the length to diameter ratio of inclusion piles (L/D), the effective depth will first increase and then reach a constant value, in which the optimal range for the length to diameter ratio of piles is 15 to 30. Also, the effective depth increases linearly with an increasing surcharge ratio above the inclusion piles (\bar{q}).

Finally, it should be noted that the soil improvement using inclusion piles due to the kinematic interaction can apply a new foundation input motion altered from the free-field ground response. This interaction increases the effective depth of the equivalent free-field model, which can reduce responses of the aboveground structures (e.g., buildings or bridges, etc.). Therefore, the use of this type of piles due to having more stiffness than traditional soil improvement approaches such as stone columns or deep soil mixing, etc., can be effective in order to optimally design structures located on loose or soft saturated soils.

Keywords: Inclusion Piles, Numerical Analysis, Normalized Parameters, Effective Depth, Seismic Ground Response.