

مطالعه پارامتری اندرکنش سینماتیکی شمع-خاک چسبنده تحت بار دینامیکی

محمد مهدی احمدی*، محمد جواد ماشین چیان، سید سجاد هادئی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

پاسخ دینامیکی

شمع منفرد

خاک رسی

اندرکنش شمع-خاک

تحلیل عددی

خلاصه: سیستم های فونداسیون شمع بطور گسترده ای جهت پایداری سازه های در معرض بار لرزه ای مورد استفاده قرار می گیرند. تعداد زیادی از سازه ها و شالوده ها در سیستم سازه - خاک - شمع هنگامی که در معرض بار لرزه ای قرار گرفته تخریب شده اند. به دلیل پیچیدگی های موجود در مسائل اندرکنش خاک - شمع و همچنین فقدان روش های دقیق، استفاده از روش های عددی جهت تحلیل مسائل اندرکنش خاک - شمع ضروری است. در سیستم خاک - شمع تحت بارگذاری دینامیکی، پاسخ دینامیکی شمع وابسته به عوامل متعددی است. این عوامل را می توان به سه دسته اصلی شامل پارامترهای هندسی، مشخصات مصالح و نیز ویژگی های بارگذاری طبقه بندی نمود. بررسی تأثیر هر یک از عوامل فوق در پاسخ دینامیکی شمع، می تواند مهندسين را در طراحی بهتر یاری نماید. هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر این عوامل بر روی پاسخ دینامیکی شمع منفرد مدفون در خاک رسی با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود FLAC^{3D} است. یکی از مهم ترین و تأثیرگذارترین موضوعات در مدل سازی عددی پاسخ دینامیکی سیستم شمع - خاک مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای خاک است. در این مقاله از یک مدل رفتاری نرم شونده برای مدل سازی رفتار خاک تحت بارگذاری دینامیکی استفاده شده است. تحریک اعمال شده به مدل، به صورت هارمونیک سینوسی بوده که به شکل تاریخچه زمانی شتاب به کف مدل اعمال شده است. پس از اعتبارسنجی مدل به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار دینامیکی شمع پرداخته شده و ممان خمشی و جابه جایی های ایجاد شده در شمع ارائه شده و نتایج تفسیر گشته اند. نتایج بدست آمده از این مقاله نشان می دهد که مقدار ضریب اندرکنش سینماتیکی به خصوصیات بارگذاری وارده بستگی داشته و همچنین در فرکانس های بالا پاسخ سرشمع نسبت به پاسخ میدان آزاد، مقادیر کم تری دارد.

۱- مقدمه

سختی خاک و شمع و محدودیت های مرزی بالا و پایین شمع بستگی دارد. این اندرکنش حتی در غیاب سازه هم رخ می دهد و اندرکنش سینماتیکی^۱ نامیده می شود. ارزیابی مناسب رفتار لرزه ای پی های عمیق، مستلزم توجه به اثرات اندرکنش سینماتیکی سیستم خاک - پی است. مدل سازی های عددی سه بعدی^۲ از جمله بهترین ابزارها برای تحلیل غیرخطی اندرکنش دینامیکی سیستم خاک-شمع می باشند [۱].

در سال های اخیر مطالعات فراوانی در رابطه با تحلیل دینامیکی شمع ها صورت گرفته و تأثیر عوامل مختلف روی آن مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما با وجود تحقیقات گسترده، پیش بینی رفتار شمع ها در هنگام رخداد زمین لرزه، همچنان مسأله ای بحث برانگیز در حیطه ژئوتکنیک لرزه ای و مهندسی پی است. هنگامی که موج برشی ناشی از زلزله از طریق لایه خاک منتشر می شود، شمع مدفون تحریک ایجاد شده را تغییر می دهد که این به عواملی نظیر اختلاف

1 kinematic interaction

2 3D numerical analysis

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mmahmadi@sharif.edu



پاسخ خاک و ممان خمشی سینماتیکی شمع تأثیر می‌گذارد و نتیجه گرفتند که تحلیل‌های دقیق غیرخطی اغلب برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی شمع‌ها ضروری است [۷]-[۶]. کهاده^۸ و همکاران، اثرات اندرکنش شمع-خاک را با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای خاک بررسی نمودند. تحلیل‌های انجام شده نشان داد هنگامی که فرکانس بارگذاری نزدیک فرکانس طبیعی سیستم است، در پاسخ‌های بدست آمده پدیده تشدید به وجود می‌آید [۸]. غیرهمگنی و غیرخطی بودن خاک، بر روی اندرکنش سینماتیکی شمع-خاک و ممان حاصله تحت انتشار قائم امواج لرزه‌ای برشی در خاک لایه‌ای به وسیله آزمایش‌های میز لرزه یک بعدی و شبیه‌سازی‌های عددی غیرخطی توسط چیدچیچیمو^۹ و همکاران، بررسی گردیده است. به همین منظور، آن‌ها نشان دادند که ویژگی‌های غیرخطی و ناهمگنی خاک بر روی پاسخ سایت و ممان سینماتیکی شمع بسیار تأثیرگذار است، بنابراین تحلیل‌های غیرخطی غالباً برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی شمع‌ها ضروری است [۹].

در ادامه‌ی تحقیقات دزی و همکاران، اندرکنش سینماتیکی گروه شمع‌های مربعی در خاک‌های همگن مطالعه شده است. تحلیل‌ها با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی و همچنین، در نظرگیری میرایی هندسی^{۱۰} و اثرات اندرکنش شمع-خاک انجام گرفته است. مطالعات پارامتری گسترده‌ای برای تعیین اثرات عوامل مختلف، مانند مشخصات خاک، موقعیت سنگ بستر، فاصله و تعداد شمع‌ها بررسی شده است. ممان‌های خمشی به دست آمده از تحلیل‌های گروه شمع، در سرشمع و در سطح تماس دو لایه خاک نسبت به ممان‌های خمشی شمع منفرد بی بعد گردیده و منجر به ایجاد روابط طراحی جدیدی برای تخمین ممان‌های خمشی سینماتیکی در گروه شمع شده است [۱۰].

با مطالعه اجمالی بر روی مقالات منتشر شده در زمینه مدل‌سازی شمع تحت بار دینامیکی، مشاهده می‌شود که اغلب مطالعات صورت گرفته توسط محققین دارای محدودیت‌هایی بوده است. از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های این مطالعات می‌توان به دوبعدی بودن مدل‌سازی‌ها، تمرکز بر روی پاسخ روسازه، فرض رفتار خطی برای خاک و استفاده از مدل‌های ساده مبتنی بر روش وینکلر برای اندرکنش

در تحقیق کی^۱ و همکاران، با مدل‌سازی اندرکنش دینامیکی سیستم خاک - شمع به وسیله روش المان محدود سه بعدی این نتیجه حاصل شد که استفاده از رفتار خمیری برای خاک، منجر به اختلاف قابل توجه پاسخ شمع و سنگ بستر می‌شود [۲]. ماهشواری^۲ و همکاران، روش المان محدود سه‌بعدی را به منظور بررسی اثرات حالت خمیری خاک و جدایی در فصل مشترک خاک - شمع بر روی پاسخ دینامیکی شمع منفرد و گروه شمع‌ها، گسترش دادند. این محققین شمع را با یک ماده الاستیک خطی و خاک را به صورت مدل سطح منفرد سلسله‌مراتبی که مبتنی بر یک حالت خمیری پیشرفته است، مدل‌سازی کرده‌اند. با توجه به تقارن مدل فقط یک چهارم آن را ساخته‌اند و از المان‌های کلونین (فیر و میراگر) در هر سه جهت (X,Y,Z) برای شبیه‌سازی محیط خاک نامحدود استفاده کرده‌اند. همچنین، از حرکت هارمونیک برای یافتن توابع انتقال برای فونداسیون استفاده کرده‌اند. تحلیل عددی انجام شده توسط ماهشواری و همکاران بیان می‌کند که اثر جدایش، زمانی که مدل خاک الاستیک است، بسیار قابل توجه است و پاسخ غیرخطی خاک در سیستم خاک - شمع اثر مهمی در فرکانس‌های تحریک پایین دارد [۳]. مایورانو^۳ و همکاران، رفتار دینامیکی شمع‌های منفرد و گروه شمع را با استفاده از روش المان محدود بررسی کرده و بر اساس نتایج به دست آمده، ضوابط اصلاحی برای پیش‌بینی ممان‌های خمشی بیشینه پیشنهاد کرده‌اند [۴]. دزی^۴ و همکاران، با انجام تحلیل‌های پارامتریک، عوامل مؤثر بر ممان خمشی ایجاد شده در شمع تحت بارگذاری لرزه‌ای را مورد بررسی قرار داده و نمودارهایی برای تخمین ممان خمشی بیشینه شمع ارائه داده‌اند [۵]. سیکا^۵ و همکاران، پاسخ دینامیکی شمع منفرد را تحت بار لرزه‌ای بر اساس مدل تیر روی فونداسیون وینکلر^۶ مطالعه نموده و تأثیر عواملی مانند تفاوت سختی لایه‌ها، نسبت سختی شمع به سختی خاک، شدت تحریک اعمال شده، میرایی مادی خاک و محتوای فرکانسی^۷ زلزله را در پاسخ دینامیکی شمع منفرد مورد توجه قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که ناهمگنی و رفتار غیرخطی خاک به میزان زیادی بر روی

1 Cai
2 Maheshwari
3 Maiorano
4 Dezi
5 Sica
6 beam on winkler foundation
7 frequency content

8 Chehade
9 Chidichimo
10 Radiation Damping

جدول ۱. مشخصات شمع بتنی بکار رفته در ارزیابی مدل

Table 1. Properties of concrete pile used in model analysis

۲۰	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)
۰/۱۵	ضریب پواسون
۲۴	وزن مخصوص (کیلونیوتن بر مترمکعب)

جدول ۲. مشخصات خاک رس نرم

Table 2. Soft clayey soil properties

۱۱/۷۸	مدول الاستیسیته خاک (مگاپاسکال)
۱۶/۱	وزن مخصوص (کیلونیوتن بر مترمکعب)
۰/۴۲	ضریب پواسون خاک
۳۴	چسبندگی مؤثر (کیلوپاسکال)
۱۵/۶	زاویه اصطکاک داخلی

آمده و مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در شکل‌های ۱ و ۲، نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر و پژوهش ماهشواری مقایسه شده‌اند. در این شکل‌ها U_0 ، U_g و U_p به ترتیب، دامنه جابجایی سنگ بستر، جابه‌جایی میدان آزاد زمین و جابه‌جایی سرشمع هستند که در برابر فرکانس بارگذاری بدون بعد ترسیم شده‌اند. مطابق این اشکال ω فرکانس زاویه ای، d قطر شمع و V_s سرعت موج برشی در محیط خاکی را نشان می‌دهد. در هر دو نمودار شکل ۱ مشاهده می‌گردد که همخوانی نتایج در فرکانس‌های پایین بهتر از فرکانس‌های بالا است. یکی از دلایل افزایش اختلاف می‌تواند شرایط متفاوت در مرزهای مدل باشد. در مطالعات ماهشواری و همکاران در مرزهای مدل از المان‌های کلونین^۱ (فتر و میراگر در حالت موازی) استفاده شده درحالی‌که در تحقیق حاضر از مرزهای جاذب و میدان آزاد^۲ استفاده شده است. در شکل‌های ۱ و ۲، در فرکانس‌های پایین یک افزایش ناگهانی در نسبت دامنه پاسخ جابه‌جایی میدان آزاد و سرشمع به دامنه حرکت سنگ بستر مشاهده می‌شود که این افزایش ناگهانی ناشی از پدیده تشدید در خاک است. در فرکانس‌های بالا مشاهده می‌شود که پاسخ سرشمع نسبت به پاسخ میدان آزاد، مقادیر کم تری دارد. به عبارت دیگر، تغییرمکان‌های ماندگار در مدل خاک میدان آزاد بیشتر است.

به منظور در نظر گرفتن ابعاد مناسب برای مدل در تحلیل‌های

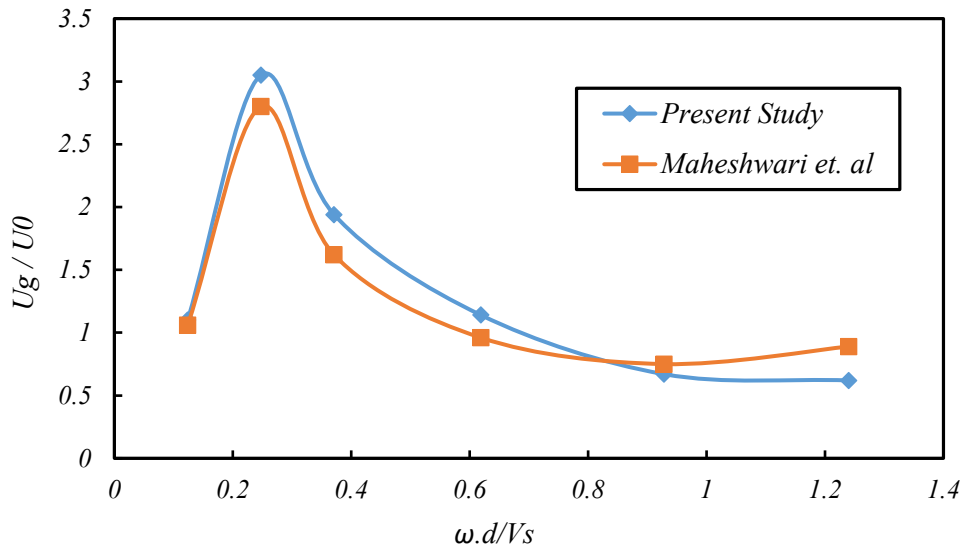
خاک-شمع اشاره نمود. در این مقاله سعی شده است که این ضعف‌ها تا حد امکان مرتفع شده و رفتار لرزه‌ای شمع‌ها بصورت دقیق‌تری بررسی شود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی پاسخ دینامیکی شمع منفرد مدفون در خاک چسبنده تحت بارگذاری شتاب هارمونیک است. به همین منظور، رفتار شمع منفرد تحت بارگذاری دینامیکی مورد تحلیل عددی سه‌بعدی کاملاً غیرخطی در حوزه زمان قرار گرفته و عوامل مؤثر بر آن مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۲- مدل سازی عددی

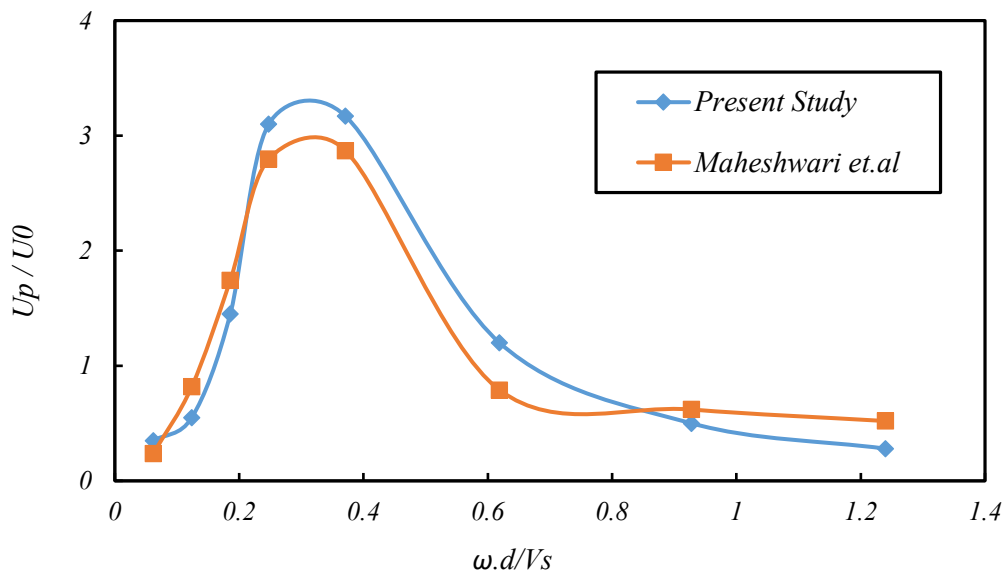
در پژوهش حاضر، در ابتدا برای اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، سیستم خاک - شمع بررسی شده توسط ماهشواری و همکاران، با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{۳D} مدل شده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از آن تحقیق مقایسه شدند. پارامترهای در نظر گرفته شده برای خاک رس نرم و شمع بتنی در پژوهش حاضر، دقیقاً همان پارامترهایی هستند که در مقاله ماهشواری و همکاران در نظر گرفته شده و مقادیر آنها در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. صحت مدل‌سازی با بررسی پاسخ میدان آزاد خاک و نیز سیستم خاک - شمع ارزیابی شده است. موج هارمونیک سینوسی با دامنه واحد به عنوان موج ورودی به کف مدل اعمال شده و پاسخ سیستم تحت فرکانس‌های ارتعاش مختلف به شکل تاریخچه زمانی بدست

1 kelvin element

2 free field



شکل ۱. پاسخ میدان آزاد در بارگذاری دینامیکی [۳]
Fig. 1. Free-field response in dynamic loading



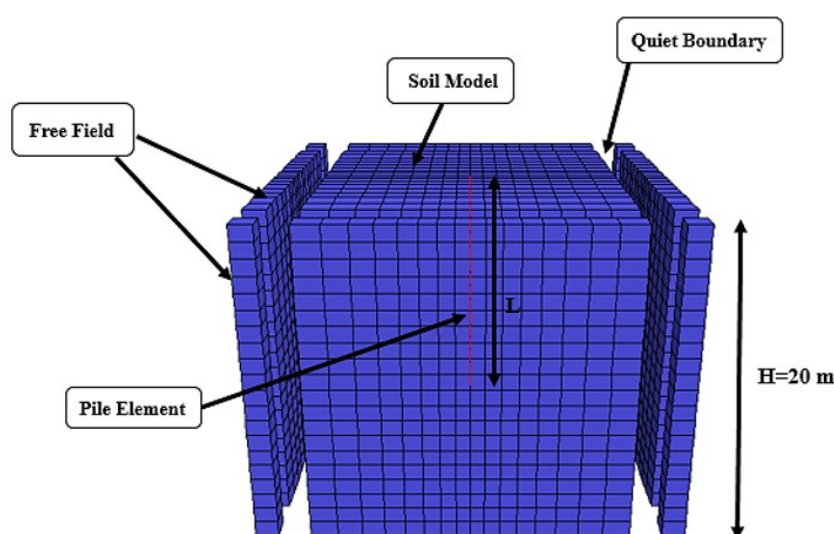
شکل ۲. پاسخ سرشمع در بارگذاری دینامیکی [۳]
Fig. 2. Head-pile response in dynamic loading

دینامیکی، مدل های مکعبی شکل با ابعاد ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ متر ایجاد شده و تحت تحریک دینامیکی، از کف مدل قرار گرفتند. نتایج تحلیل ها مطابق آنچه که در جدول ۳ آمده است، نشان داد که افزایش ابعاد مدل از ۲۰ به ۲۴ متر، تأثیر قابل توجهی در نتایج به دست آمده، از جمله شتاب های ایجاد شده در سر شمع و حداکثر ممان ایجاد شده در شمع نداشته است. بنابراین در این پژوهش، ابعاد مدل در جهت X، Y و Z برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شده و شمع بتنی در

1 quiet boundary

جدول ۳. تأثیر ابعاد مدل بر نتایج به دست آمده حاصل از مدل سازی
Table 3. Effect of model dimensions on the result of modeling

حداکثر شتاب ایجاد شده در سر شمع (متر بر مجذور ثانیه)	حداکثر ممان خمشی در طول شمع (کیلو نیوتن متر)	حداکثر جابه جایی در طول شمع (میلی متر)	
۲/۴	۱۱۲/۶	۶۴	مدل ۱۲ متری
۲/۱	۱۰۷/۷	۶۸	مدل ۱۶ متری
۱/۸	۱۰۴/۵	۷۰	مدل ۲۰ متری
۱/۸	۱۰۴/۲	۷۱	مدل ۲۴ متری

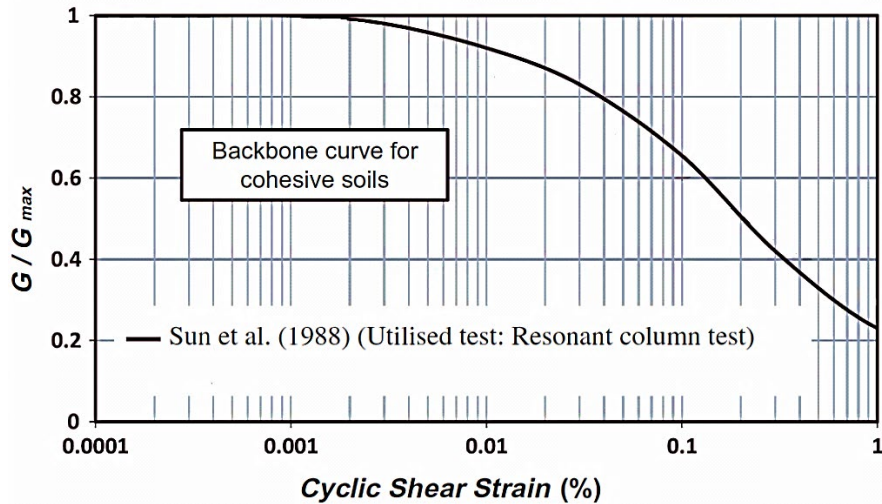


شکل ۳. نمای کلی از مدل ایجاد شده
Fig. 3. Schematic view of created model

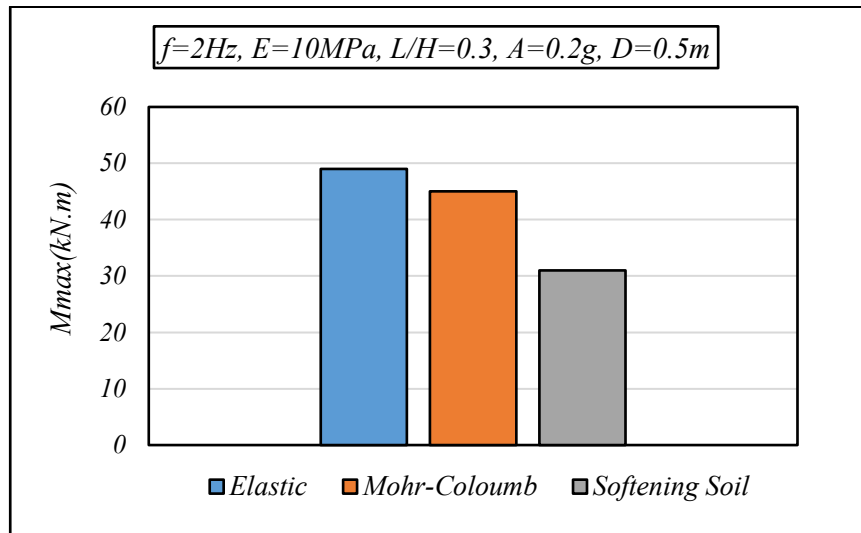
خواهد شد. در این حالت نیروی مقاومی از سوی خاک در برابر شمع احساس نمی شود، زیرا وظیفه این ارتباط به عهده فنر اتصالی است. مقدار حداکثر برای سختی فنر اتصالی طبق پیشنهاد نرم افزار، ده برابر $\left\{ \frac{K + \frac{4}{3}G}{AZ_{min}} \right\}$ است. در این رابطه K و G به ترتیب مدول بالک (حجمی) و مدول برشی محیط پیوسته خاک و AZ_{min} اندازه کوچکترین بعد شبکه خاک اطراف فنر است. در کلیه مدل سازی های این تحقیق نیز، از این رابطه برای بدست آوردن سختی های فنر استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مدل سازی انجام شده امکان جدایش بین المان های خاک- شمع در نظر گرفته است. شکل ۳ نمای کلی از مدل ساخته شده را نشان می دهد.

خاک تحت بارهای لرزه ای دامنه کرنش هایی در محدوده متوسط

به صورت تاریخچه زمانی شتاب، کف مدل به صورت صلب (با اعمال تغییر مکان صفر در هر سه جهت X ، Y ، و Z) در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی شمع، از المان خمشی استفاده شده است. المان سازه ای شمع بصورت یک قطعه مستقیم با خصوصیات یکنواخت است که از بین دو نقطه گرهی می گذرد. این المان دارای سختی محوری و خمشی بوده و قابلیت تحمل خمش را دارد. اتصال شمع به محیط، از طریق المان های حدفاصل صورت می گیرد. المان های حدفاصل در این نرم افزار فترهایی هستند که بصورت برشی و عمودی قرار گرفته اند. فترهای اتصالی باید به گونه ای عمل کنند که در اثر اعمال بار و ایجاد نیرو در داخل شمع، جاری نشوند. در غیر این صورت روند بارگذاری و افزایش بار در همان مقدار نیروی ایجاد شده متوقف



شکل ۴. تغییرات مدول برشی خاک با کرنش برشی برای خاک های چسبنده (سان و همکاران) [۱۲]
 Fig. 4. Shear modulus versus cyclic shear strain for cohesive soils (Sun *et al.*)



شکل ۵. مقایسه حداکثر ممان ایجاد شده در شمع در مدل های رفتاری مختلف
 Fig. 5. Comparison of maximum bending moment in piles in different constitutive models

(۱۹۸۲) مطابق شکل ۴، منظور گردیده است [۱۱].
 به منظور بررسی تأثیر رفتار در نظر گرفته شده برای خاک تحت بارگذاری دینامیکی، برای خاک سه نوع مدل رفتاری الاستیک، مور-کولمب و مدل نرم شونده استفاده شده در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته اند. شکل ۵ حداکثر ممان ایجاد شده در شمع را طی بارگذاری دینامیکی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود بیشترین ممان به وجود آمده مربوط به مدل رفتاری الاستیک بوده و پس از آن مدل رفتاری مور-کولمب پاسخ های بیشتری را نسبت به مدل رفتاری نرم شونده به همراه دارد. کم تر بودن مقدار ممان در

و بزرگ تجربه کرده و رفتار نرم شونده از خود نشان می دهد؛ لذا برای مدل سازی و بررسی دقیق تر رفتار سیستم خاک-شمع تحت بارهای دینامیکی، ضروری است که رفتار غیرخطی خاک در نظر گرفته شود. در پژوهش حاضر، برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک، مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک انتخاب شد؛ هم چنین برنامه ای در محیط نرم افزار کدنویسی شد که با افزایش دامنه کرنش برشی، مدول برشی خاک را کاهش دهد. نحوه ی تغییر مدول برشی در برنامه کدنویسی شده، مطابق با مطالعات آزمایشگاهی سان و همکاران^۱

¹ Sun *et al.*

جدول ۴. مشخصات هندسی و مکانیکی مدل مورد مطالعه و بارهای دینامیکی اعمالی

Table 4. Geometrical and mechanical properties of the studied model and applied dynamic loads

خاک نرم	خاک متوسط	خاک سخت	
۱۶۰۰	۱۸۰۰	۲۰۰۰	دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۰	۲۰	۸۰	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
۱۰	۲۵	۵۰	مقاومت برشی زهکشی نشده (کیلوپاسکال)
۰/۳، ۰/۵، ۰/۸	۰/۳، ۰/۵، ۰/۸	۰/۳، ۰/۵، ۰/۸	L/H (نسبت طول شمع به عمق لایه خاک)
۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲	قطر شمع (متر)
۲،۴،۸	۲،۴،۸	۲،۴،۸	فرکانس بارگذاری (هرتز)
۰/۲ g، ۰/۵ g، ۱ g	۰/۲ g، ۰/۵ g، ۱ g	۰/۲ g، ۰/۵ g، ۱ g	دامنه بارگذاری

رایلی تغییر یافته است. مقدار میرایی بحرانی نیز، مطابق با تحقیقات سای و همکاران برابر با ۵ درصد فرض شده است.

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله فرکانس و دامنه بارگذاری، قطر و طول شمع و نیز سختی خاک، بر روی پاسخ دینامیکی سیستم شمع منفرد در خاک رسی، تحلیل‌های دینامیکی در حوزه زمان انجام شده و مقادیر حداکثر ممان خمشی و جابه‌جایی ایجاد شده در شمع، در هریک از مدل‌ها بدست آمد. در این تحلیل‌ها از سه نوع خاک با سختی‌های متفاوت استفاده گردید. قطر شمع‌ها برای این تحلیل‌های دینامیکی برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر منظور شد. نسبت L/H (در شکل ۳ تعریف شده‌اند) برای شمع‌ها نیز برابر با ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۸ بود. فرکانس و دامنه بارگذاری‌های هارمونیک اعمال شده به کف مدل به ترتیب برابر با ۲، ۴ و ۸ هرتز و ۰/۲g، ۰/۵g و ۱g در نظر گرفته شدند. مشخصات مدل مورد مطالعه (هندسی و مکانیکی) و همچنین بارهای دینامیکی اعمالی به مدل نیز، به صورت خلاصه در جدول ۴ نشان داده شده است.

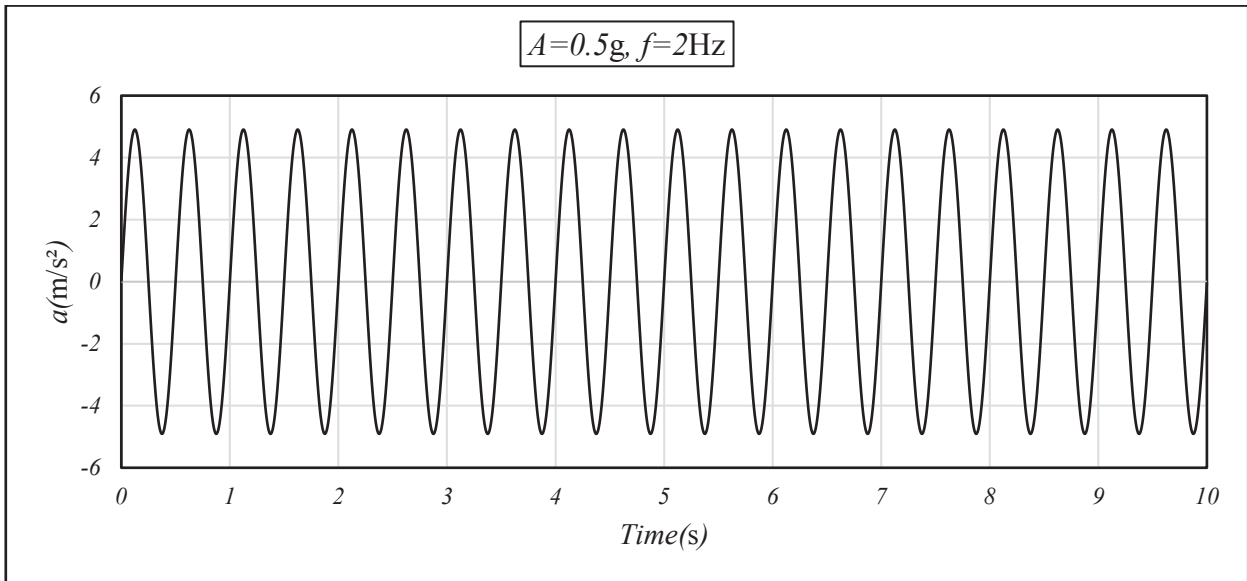
در شکل ۳، پارامترهای L و H تعریف شده‌اند. در تمامی تحلیل‌های انجام گرفته مقدار عمق لایه خاک (H) ثابت و برابر ۲۰ متر در نظر گرفته شده و تنها پارامتر طول شمع تغییر یافته است. همچنین، در مدل‌سازی‌های انجام شده، برای شبیه‌سازی هرچه بیشتر مسأله با واقعیت، سرشمع‌ها امکان دوران ندارند. در شکل ۶، نمونه‌ای از بارگذاری هارمونیک اعمال شده به مدل نشان داده است.

خاک با مدل رفتاری نرم شونده، بدین صورت توجیه می‌شود که نرم شدن خاک در کرنش‌های بالا در اثر تحریک دینامیکی باعث کاهش توانایی شمع در جذب نیروها می‌گردد.

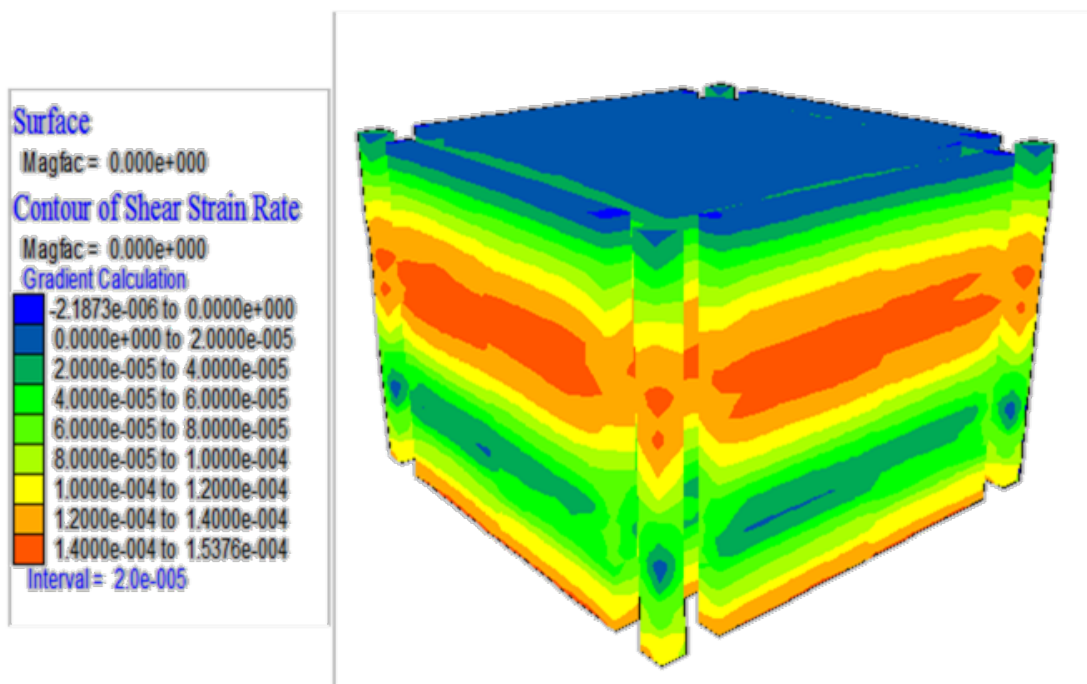
یکی دیگر از مسائل مهم، انتخاب میرایی مناسب برای مدل ایجاد شده است. میرایی استفاده شده در این پژوهش از نوع میرایی رایلی است. میرایی رایلی نسبت به سایر میرایی‌ها دارای برتری‌هایی است؛ میرایی موضعی مؤلفه‌های فرکانسی بالا را کمتر میرا نموده و خطای بیشتری را در فرکانس‌های بالا ایجاد می‌نماید و در مسائل دینامیکی پیچیده استفاده از این نوع میرایی توصیه نمی‌شود. همچنین میرایی هیستریسیس نیز، بصورت غیرمستقیم تابعی از کاهش مدول خاک است و شناخت مقدار میرایی واقعی برای استفاده در مدل برای آن دشوار است. علاوه بر آن، روابط میرایی بدست آمده برای میرایی هیستریسیس، منحنی‌های آزمایشگاهی را توجیه نمی‌نماید و این نوع میرایی، تغییرشکل‌های اتفاق افتاده را بیش از حد واقعی خود نشان می‌دهد [۱۲].

برای اعمال میرایی رایلی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ به دو پارامتر نیاز است. درصدی از میرایی بحرانی و یک مرکز برای بازه‌ی فرکانسی که این میرایی اعمال می‌شود. طبق مطالعه صورت گرفته توسط سای^۱ و همکاران (۲۰۱۴)، در هنگام اعمال بارگذاری هارمونیک، فرکانس مرکزی مناسب، برابر با فرکانس موج هارمونیک است. در این تحقیق نیز، بدین گونه عمل شده و همزمان با اعمال بارگذاری‌های هارمونیک با فرکانس‌های مختلف، فرکانس مرکزی مربوط به میرایی

1 Tsai



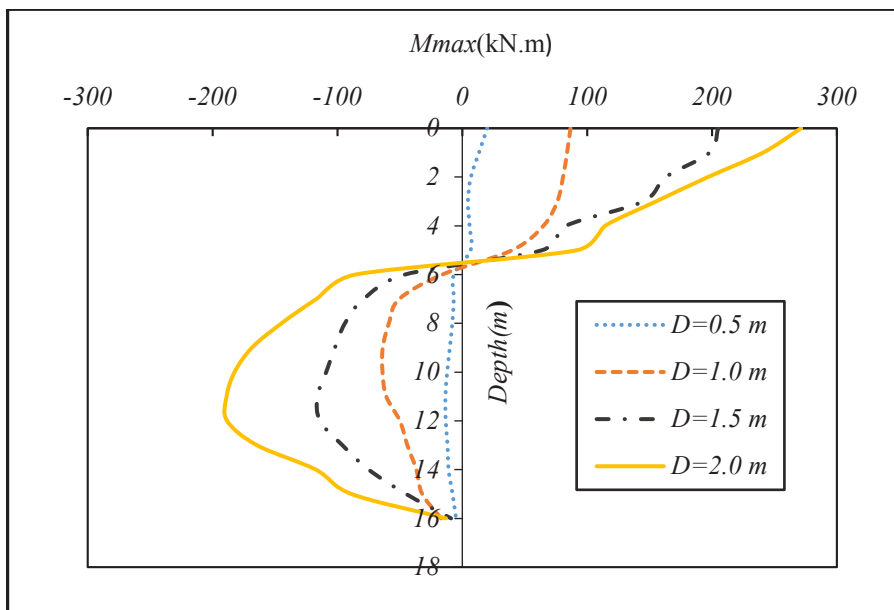
شکل ۶. نمونه ای از بار هارمونیک اعمالی به مدل
 Fig. 6. An example of harmonic loading



شکل ۷. کانتور نرخ کرنش برشی پس از بارگذاری دینامیکی
 Fig. 7. Contour of shear strain rate after dynamic loading

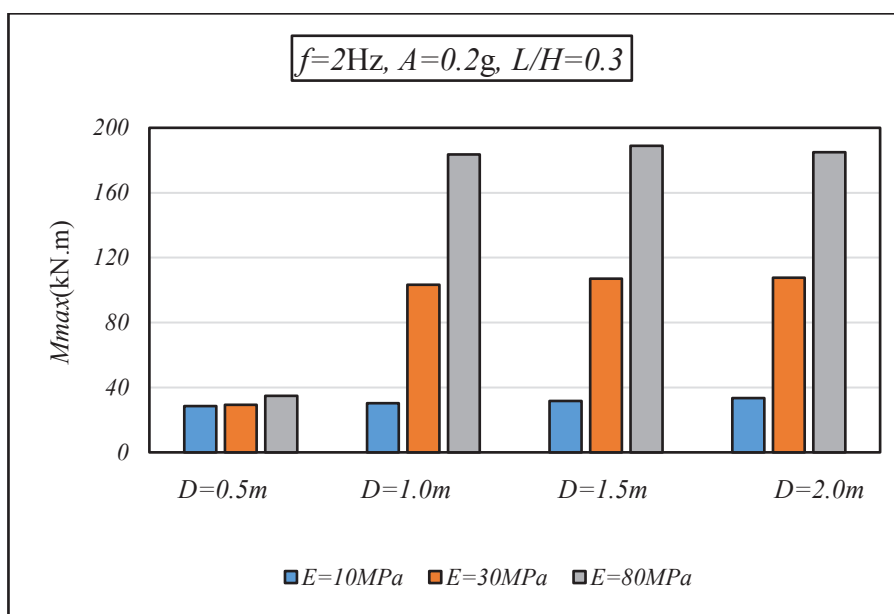
در ادامه مقاله، خلاصه ای از نتایج مدل سازی های انجام شده آورده شده است. شکل ۷ نمودار کانتور نرخ کرنش های برشی پس از بارگذاری دینامیکی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود بیشترین نرخ تغییرات کرنش برشی در کف مدل و همچنین بخش

در این مطالعه از مولفه قائم بارگذاری دینامیکی مولفه قائم ندارد؛ زیرا نیروهای استاتیکی قائم سازه معمولاً مقاومت کافی در مقابل شتاب های قائم ایجاد شده در برابر زلزله را داشته و معمولاً نقش مهمی را در خرابی سازه ها ایفا نمی کنند.



شکل ۸. تغییرات ممان حداکثر در طول شمع

Fig. 8. Distribution of maximum bending moment along with the pile



شکل ۹. تأثیر سختی خاک بر حداکثر ممان خمشی به وجود آمده در شمع

Fig. 9. Effect of soil hardness on the maximum bending moment of the pile

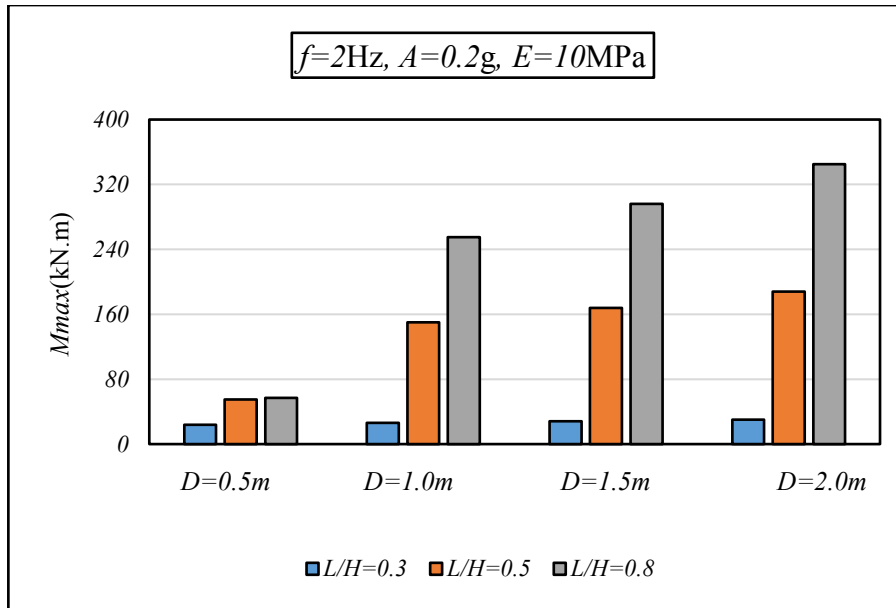
که مشاهده می شود بیشترین مقدار ممان خمشی در شمع با قطر ۲ متری ایجاد شده است که دلیل آن می تواند سختی بیشتر این شمع نسبت به سایر شمع ها باشد. روند تغییرات ممان خمشی در طول شمع حاکی از آن است که بیشترین مقادیر ممان در سرشمع و در نواحی میانی شمع رخ داده است و در نوک شمع به علت آزاد بودن

انتهایی شمع (وسط مدل) که بیشترین مقادیر جابه جایی ها را دارند، مشاهده می شود.

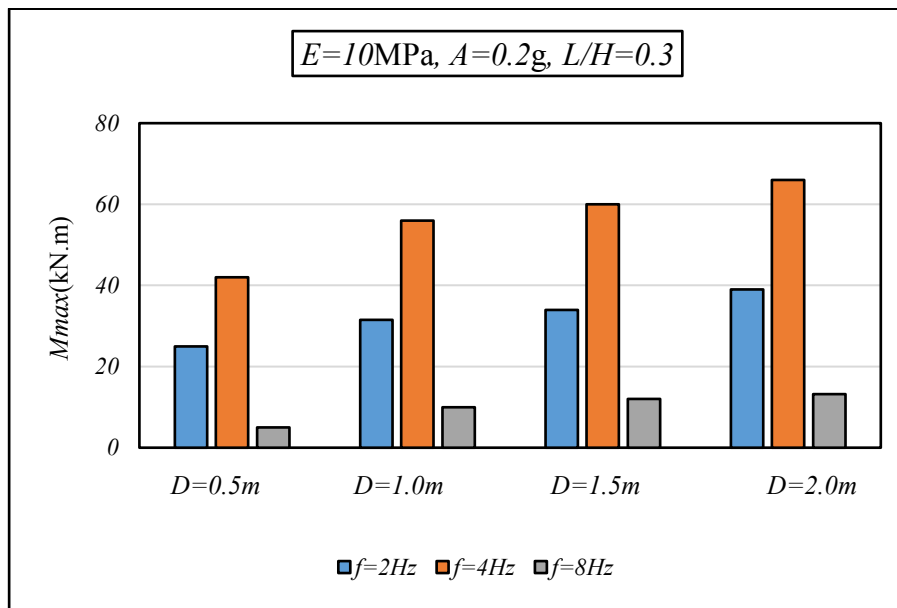
در شکل ۸ تغییرات ممان خمشی در طول شمع هایی با قطر مختلف، مدول الاستیسیته ۳۰ مگاپاسکال، مقدار فرکانس ۲ هرتز، دامنه ۰/۵g و نسبت L/H برابر ۰/۸ نشان داده شده است. همان طور

خاک ممان خمشی بیشتری در شمع پدید می‌آید. برای نمونه، با افزایش سختی خاک از ۳۰ به ۸۰ مگاپاسکال، افزایش ۶۴ درصدی در حداکثر ممان به وجود آمده برای شمع با قطر ۲ متر مشاهده می‌شود. این روند در سایر بارگذاری‌ها نیز مشاهده می‌شود. نتایج بدست آمده در این شکل، با مطالعات صورت گرفته توسط دزی و همکاران مطابقت دارد [۱۰].

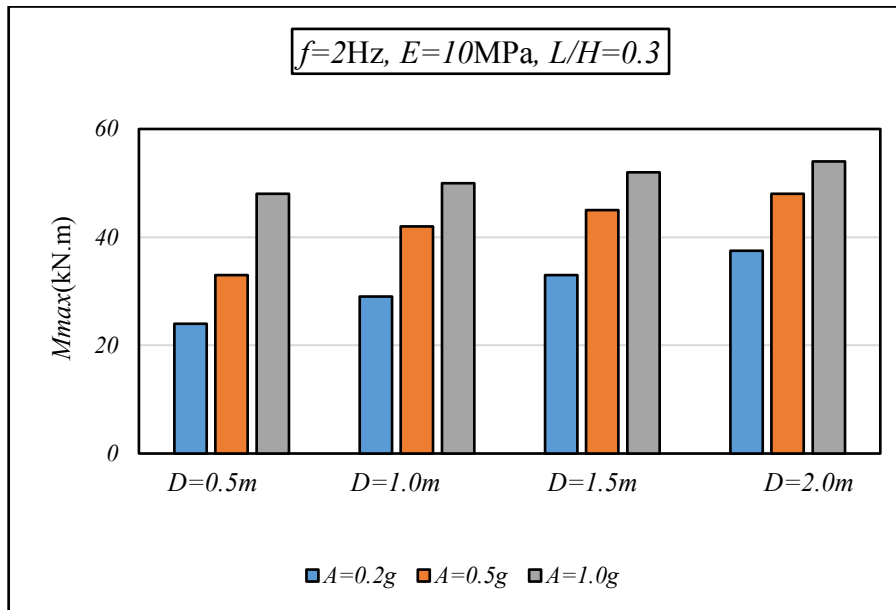
انتهای شمع، مقدار ممان به مقدار تقریبی صفر می‌رسد. حداکثر ممان خمشی ایجاد شده در شمع، در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نشان داده شده است. نتایج مربوط به حداکثر ممان خمشی به وجود آمده در شمع برحسب قطر شمع و به ازای سختی‌های خاک مختلف برای بارگذاری با فرکانس و دامنه مشخص در شکل ۹، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش سختی و مدول الاستیسیته



شکل ۱۰. تأثیر طول شمع بر حداکثر ممان خمشی به وجود آمده در شمع
 Fig. 10. Effect of pile length on the maximum bending moment of the pile



شکل ۱۱. تأثیر فرکانس بارگذاری بر حداکثر ممان خمشی به وجود آمده در شمع
 Fig. 11. Effect of loading frequency on the maximum bending moment of the pile

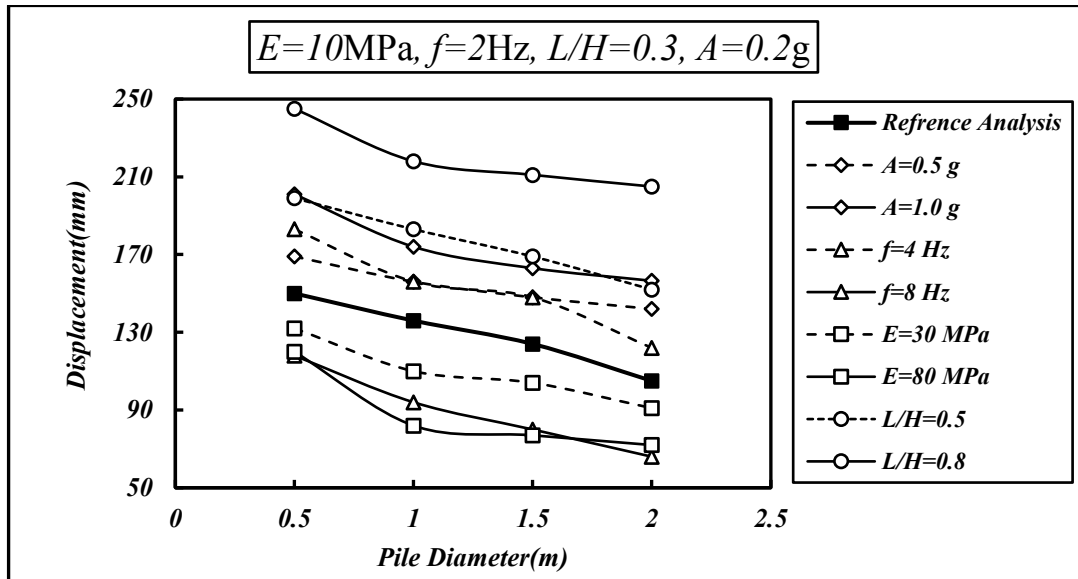


شکل ۱۲. تأثیر دامنه بارگذاری بر حداکثر ممان خمشی به وجود آمده در شمع
Fig. 12. Effect of loading amplitude on the maximum bending moment of the pile

شده به مدل مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق انتظار بزرگتر شدن دامنه بارگذاری موجب افزایش مقدار ممان ایجاد شده در شمع شده است. برای نمونه با افزایش دامنه بارگذاری از $0.5g$ به $1g$ ، میزان ممان حداکثر در بیشترین حالت خود که برای شمع 0.5 متری رخ می دهد، تقریباً ۴۷ درصد افزایش یافته است، درحالی که این افزایش برای شمع ۲ متری تنها ۸ درصد است. نکته قابل توجه در شکل ۹، ثابت ماندن تقریبی مقادیر ممان در قطرهای ۱، $1/5$ و ۲ با افزایش سختی است. درحالی که با افزایش قطر از 0.5 به ۱ متر، تغییر قابل توجهی در مقدار ممان ایجاد شده در شمع رخ داده است. به نظر می رسد در طراحی شمع ها در حالت دینامیکی نیاز به دقت بیشتری در تعیین قطر مناسب وجود دارد.

شکل ۱۳، حداکثر جابه جایی ایجاد شده در طول شمع را به ازای شرایط مختلف نشان می دهد. مطابق این شکل، مدل با مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال، فرکانس ۲ هرتز، دامنه $0.2g$ و نسبت L/H برابر 0.3 به عنوان منحنی مرجع در نظر گرفته شده و در سایر نمودارها یکی از موارد مؤثر به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و تأثیر آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این شکل، افزایش نسبت L/H موجب افزایش جابه جایی بوجود آمده در شمع شده است. افزایش دامنه بارگذاری نیز، مطابق انتظار موجب افزایش مقدار

در شکل ۱۰، تأثیر طول شمع در حداکثر ممان ایجاد شده در شمع، نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می شود که در شمع با قطر 0.5 متر، برای دو شمع با L/H های برابر با 0.5 و 0.8 اختلاف مقدار ممان حداکثر ناچیز است، درحالی که اختلاف مقدار ممان خمشی این دو نمودار در قطرهای بالاتر افزایش یافته و در شمع با قطر ۲ متر مقدار اختلاف در ممان خمشی برابر با ۱۴۲ کیلونیوتن متر است. همچنین، در شکل ۱۱، تأثیر فرکانس بارگذاری بر ممان خمشی به وجود آمده در شمع نشان داده شده است. نکته قابل توجه آن است که ممان ایجاد شده تحت بارگذاری با فرکانس ۸ هرتز مقدار کمتری نسبت به ممان ایجاد شده تحت سایر فرکانس ها دارد. دلیل این موضوع می تواند اختلاف زیاد این فرکانس با فرکانس طبیعی سیستم خاک - شمع باشد. لازم به ذکر است که برای بدست آوردن فرکانس طبیعی سیستم خاک - شمع مدل شده، با اعمال بارگذاری دینامیکی با فرکانس های مختلف، پاسخ سیستم (جابه جایی سر شمع) را در حوزه فرکانسی بررسی نموده و در نهایت فرکانس تشدید با توجه به پاسخ های مشاهده شده از روند نمودار (مشابه شکل ۱) مقداری برابر $4/12$ هرتز بدست آمده است. به همین دلیل، در بارگذاری های با فرکانس ۴ هرتز بیشترین مقدار پاسخ مشاهده می شود. در شکل ۱۲ نیز، تأثیر دامنه بارگذاری وارد



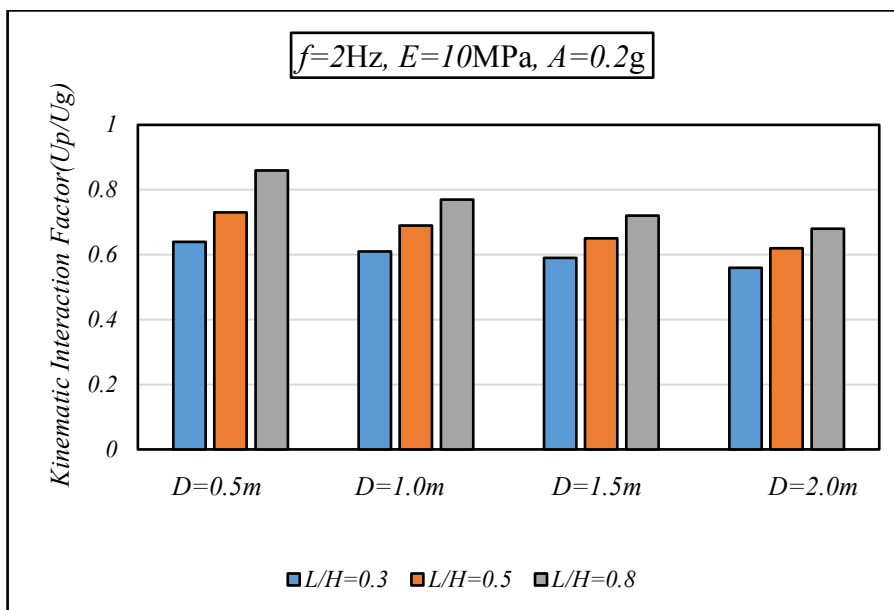
شکل ۱۳. تأثیر عوامل مختلف بر حداکثر جابه‌جایی به وجود آمده در شمع
 Fig. 13. Effect of different factors on the maximum displacement of the pile

فونداسیون سازه که مبنای اندرکنش سینماتیکی است، بررسی گردد. شکل ۱۴، نسبت دامنه حرکت سر شمع به میدان آزاد (ضریب اندرکنش سینماتیکی) را در مقابل قطرهای مختلف شمع، نشان می‌دهد. روشن است که افزایش قطر شمع باعث کاهش در مقدار ضریب اندرکنش سینماتیکی گردیده است، و به ازای تمامی قطرهای مدل شده این ضریب کمتر از مقدار واحد است. همچنین، با افزایش طول شمع مقدار ضریب اندرکنش سینماتیکی افزایش پیدا کرده است. برای مثال در شمع با L/H برابر با $0/5$ در قطر ۲ متر مقدار ضریب برابر با $0/۶۲$ و در شمع با قطر $0/5$ متری مقداری برابر با $0/۷۳$ دارد. این مطلب بدان معناست که برای این نوع بارگذاری خاص، در نظرگیری حرکت تراز پی ساختمان برابر با زمین میدان آزاد، محافظه‌کارانه است.

یکی دیگر از بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش بررسی مقادیر پاسخ‌های بدست آمده در حوزه زمانی است. برای نمونه در شکل ۱۵ تغییرات جابه‌جایی‌های به وجود آمده در طول شمع، در زمانی معین از بارگذاری (درثانیه ششم اعمال بار)، مشاهده می‌گردد. در این شکل نیز، شمع با قطر $0/5$ متر، میزان جابه‌جایی بیشتری را متحمل شده است و مقدار حداکثر جابه‌جایی در آن $۹۱/۴$ میلی‌متر است، همچنین در شمع با قطر ۲ متر رفتار صلب تری مشاهده می‌شود. در شکل ۱۶ نیز، روند تغییرات جابه‌جایی یک شمع با شرایط

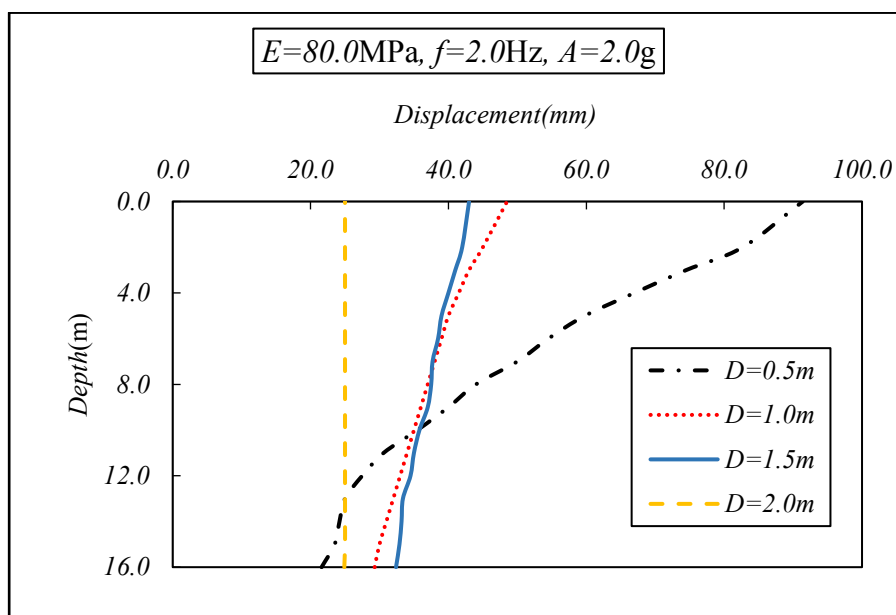
حداکثر جابه‌جایی شده است. همچنین افزایش مدول الاستیسیته و سخت تر شدن خاک موجب کاهش حداکثر جابه‌جایی به وجود آمده در شمع شده است. فرکانس بارگذاری نیز، بخصوص در مقادیر نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته و مقادیر جابه‌جایی بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به روند نمودارها تأثیر نسبت L/H بیشتر از سایر موارد در میزان جابه‌جایی‌های به وجود آمده در شمع تأثیرگذار است، لذا طراحی طول شمع در مسائل ژئوتکنیکی حائز اهمیت بوده و نیاز به دقت بیشتر دارد.

در تعیین نیروی طراحی زلزله معمولاً حرکت زمین در تراز پی ساختمان مساوی حرکت میدان آزاد زمین، یعنی حرکتی که در صورت عدم وجود ساختمان در محل ممکن بود رخ دهد، فرض می‌شود. هنگامی که زمین نرم باشد دوره ارتعاش ساختمان بیشتر می‌شود، زیرا حرکت پی شامل هر دو مولفه دورانی و انتقالی خواهد بود. علاوه بر آن، بخش بیشتری از انرژی توسط میرایی در خلال تابش امواج زلزله از پی تلف می‌شود. این موضوع نشان دهنده نقش مؤثر حضور خاک در تحلیل‌های با نیروی دینامیکی است. بنابراین در نظر گرفتن پی و خاک در کنار هم در طراحی لرزه‌ای ضروری به نظر می‌رسد. می‌توان نشان داد که حضور سازه‌ی شمع نیز بر روی پاسخ اثر می‌گذارد، که این موضوع از حوصله این مطالعه خارج است. در این مطالعه، سعی شده است تا تأثیر شمع بر حرکت توده خاک و



شکل ۱۴. تغییرات ضریب اندرکنش سینماتیکی به ازای قطر و طول‌های مختلف شمع

Fig. 14. Kinematic interaction coefficient for different length and pile diameters

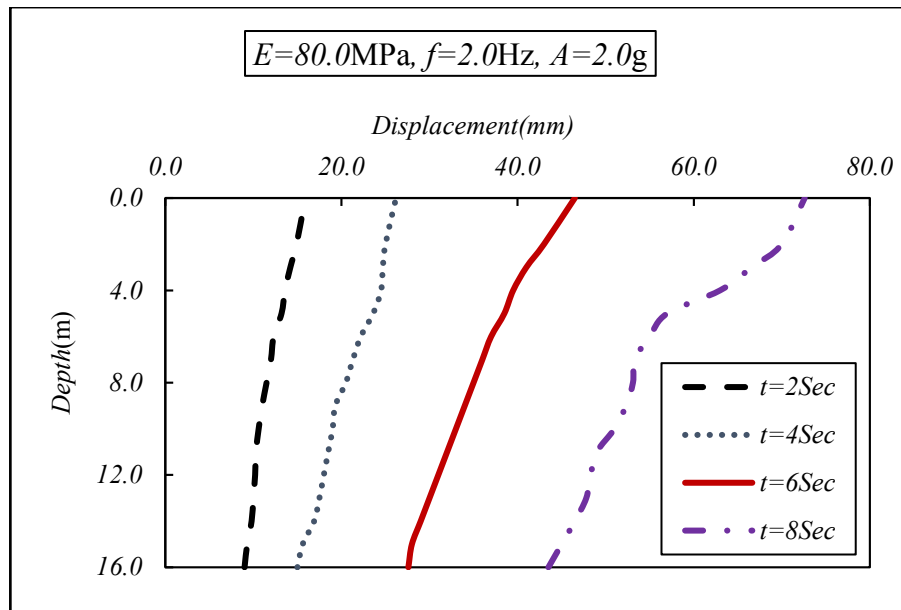


شکل ۱۵. جابه‌جایی‌های به وجود آمده در طول شمع در ثانیه ششم بارگذاری برای قطرهای مختلف شمع

Fig. 15. Displacement of the pile in the sixth second of loading for different pile diameters

میلی‌متر و از ثانیه ششم تا هشتم بارگذاری مقدار حداکثر جابه‌جایی به مقدار ۲۶/۱ میلی‌متر افزایش یافته است و در انتهای بارگذاری (ثانیه هشتم) نحوه تغییرات جابه‌جایی در طول شمع کاملاً شکل غیرخطی به خود می‌گیرد.

مشخص در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش زمان بارگذاری مقدار جابه‌جایی‌ها روند سریع تری به خود گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از ثانیه چهارم تا ششم بارگذاری مقدار حداکثر جابه‌جایی به مقدار ۱۹



شکل ۱۶. نحوه تغییرات جابه‌جایی در طول شمع در حین بارگذاری برای شمع با قطر ۱ متر
Fig. 16. Displacement along with the pile in dynamic loading for 1m diameter pile

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سیستم شمع منفرد مدفون در خاک چسبنده بصورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد و با استفاده از مدل رفتاری غیرخطی تحت بار دینامیکی هارمونیک سینوسی قرار داده شد و پاسخ شمع و عوامل مؤثر بر آن، در حوزه زمانی، مورد مطالعه قرار گرفت. از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به ضعف نرم افزار در بررسی اینترفیس‌های خاک - شمع پس از بارگذاری دینامیکی اشاره نمود. با توجه به تحلیل‌هایی که بر روی مدل صورت گرفته است، نتایج کلی زیر بدست آمده است:

۱. با افزایش قطر شمع ممان خمشی ایجاد شده در شمع تحت بارگذاری دینامیکی بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما جابه‌جایی‌های به وجود آمده در شمع، با افزایش قطر شمع، کاهش می‌یابد.
 ۲. افزایش سختی خاک باعث افزایش ممان خمشی ایجاد شده در شمع می‌گردد؛ درحالی‌که جابه‌جایی به وجود آمده در شمع کاهش می‌یابد.

۳. افزایش طول شمع، تأثیری بر خلاف قطر شمع داشته و مقدار جابه‌جایی‌های ایجاد شده در طول شمع را افزایش می‌دهد. لازم به یادآوری است که در بسیاری از موارد عملی، افزایش طول شمع برای

رسیدن به لایه با مقاومت کافی، گریزناپذیر است.

۴. مقدار ضریب اندرکنش سینماتیکی به خصوصیات بارگذاری وارده بستگی دارد. افزایش قطر شمع نیز، باعث کاهش مقدار ضریب اندرکنش سینماتیکی گردیده است و به ازای تمامی قطرهای مدل شده این ضریب کمتر از مقدار واحد است. این مطلب بدین معناست که در نظرگیری حرکت تراز پی ساختمان برابر با زمین میدان آزاد محافظه کارانه است.

۵. در فرکانس‌های بالا مشاهده شد که پاسخ سرشمع نسبت به پاسخ میدان آزاد، مقادیر کم تری دارد. به عبارت دیگر، تغییر مکان‌های ماندگار در مدل خاک میدان آزاد بیشتر است.

۶. در اثر بار دینامیکی بیشترین مقادیر کرنش برشی در کف مدل و در قسمت انتهایی شمع ایجاد می‌شود.

۷. افزایش طول شمع بیشتر از سایر موارد در افزایش مقدار ممان شمع تأثیر داشته و لازم است توجه بیشتری در طراحی طول شمع‌ها صورت گیرد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A دامنه بارگذاری، g

Kinematic response analysis of piled foundations under seismic excitation, Canadian Geotechnical Journal, .584-571 (2009) (5)46

- [5] F. Dezi, S. Carbonari, G. Leoni, Kinematic bending moments in pile foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, .132-119 (2010) (3)30
- [6] S. Sica, G. Mylonakis, A.L. Simonelli, Transient kinematic pile bending in two-layer soil, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, .905-891 (2011) (7)31
- [7] S. Sica, G. Mylonakis, A.L. Simonelli, Strain effects on kinematic pile bending in layered soil, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, .242-231 (2013) 49
- [8] F.H. Chehade, M. Sadek, D. Bachir, Numerical study of piles group under seismic loading in frictional soil - Inclination effect, Open Journal of Earthquake Research, .15 (2014) (01)3
- [9] A. Chidichimo, R. Cairo, G. Dente, C.A. Taylor, G. Mylonakis, -1g experimental investigation of bi-layer soil response and kinematic pile bending, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, .232-219 (2014) 67
- [10] F. Dezi, H. Poulos, Kinematic bending moments in square pile groups, International Journal of Geomechanics, .04016066 (2016) (3)17
- [11] A.S. Hokmabadi, B. Fatahi, Influence of foundation type on seismic performance of buildings considering soil-structure interaction, International Journal of Structural Stability and Dynamics, .1550043 (2016) (08)16
- [12] C. Tsai, D. Park, C. W. Chen, Selection of the optimal frequencies of viscous damping formulation in nonlinear time-domain site response analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, .358-353 (2014) 67

قطر شمع، m	d
مدول الاستیسیته، MPa	E
فرکانس بارگذاری، Hz	f
مدول برشی خاک، MPa	G
مدول برشی حداکثر خاک، MPa	G_{max}
ارتفاع لایه خاک تا سنگ بستر، m	H
مدول بالک خاک، MPa	K
طول شمع، m	L
ممان حداکثر شمع، kN.m	M_{max}
دامنه جابه‌جایی سنگ بستر، mm	U_0
دامنه جابه‌جایی میدان آزاد زمین، mm	U_g
دامنه جابه‌جایی سرشمع، mm	U_p
بزرگترین بعد المان، m	ΔL
کوچک‌ترین بعد المان خاک، m	ΔZ_{min}
علائم یونانی	
فرکانس زاویه ای بارگذاری، Hz	ω
طول موج دینامیکی، m	λ

مراجع

- [1] Anandarajah, J. Zhang, Simplified finite element modeling of nonlinear dynamic pile-soil interaction, Retrieved February, .2005 (2000) 10
- [2] Y. Cai, P. Gould, C. Desai, Nonlinear analysis of 3D seismic interaction of soil-pile-structure systems and application, Engineering Structures, .199-191 (2000) (2)22
- [3] B.K. Maheshwari, K.Z. Truman, M.H.E. Naggar, P.L. Gould, Three-dimensional finite element nonlinear dynamic analysis of pile groups for lateral transient and seismic excitations, Canadian Geotechnical Journal, .133-118 (2004) (1)41
- [4] R.M.S. Maiorano, L. de Sanctis, S. Aversa, A. Mandolini,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.M. Ahmadi, M.J. Mashinchian, S. Hadei, Parametric Study of Kinematic Interaction in Pile-Cohesive Soil under Dynamic Loads, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2765-2780.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17487.6580



