

## بررسی آزمایشگاهی و عددی پی‌های رادیه شمع تحت بارگذاری لرزه‌ای

علیرضا سعیدی عزیزکندی<sup>۱</sup>

علی کمک پناه<sup>۲</sup>

سعید صفی خانی<sup>۳\*</sup>

### چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش روزافزون استفاده از روش‌های نوین در ساخت سازه‌ها، بررسی دقیق‌تر این روش‌ها بی‌تردید می‌تواند در بهینه‌سازی این سیستم‌های سازه‌ای مفید واقع شود. در این بررسی، به مطالعه آزمایشگاهی میز لرزه و تحلیل عددی المان محدود بر روی پی‌های مرکب پرداخته شده است. به این منظور ابتدا تعدادی آزمایش میز لرزه بر روی نمونه کوچک مقیاس پی مرکب رادیه شمع انجام شد و عملکرد این مجموعه در حالت شمع‌های متصل و منفصل به رادیه در شتاب‌های مختلف تحت موج سینوسی بررسی شد. در ادامه با تدقیق مدل‌سازی عددی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی، عملکرد این سیستم در ابعاد واقعی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که سیستم منفصل، لنگر کمتری نسبت به سیستم متصل به شمع‌ها انتقال می‌دهد و از سویی جابه‌جایی رادیه در حالت منفصل از جابه‌جایی رادیه در سیستم متصل بیشتر است. لذا در انتخاب نوع سیستم مورد استفاده باید شرایط پروژه با شرایط عملکردی این مجموعه‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

### واژه‌های کلیدی

رادیه-شمع، میز لرزه، بارگذاری لرزه‌ای.

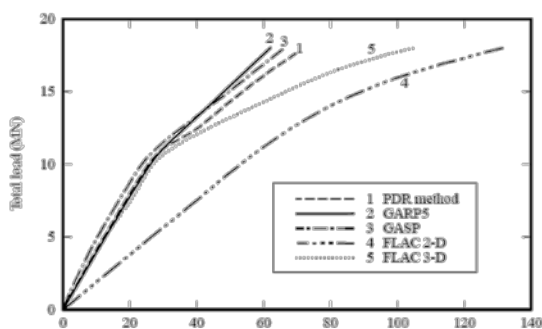
۱. استادیار دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه تربیت مدرس

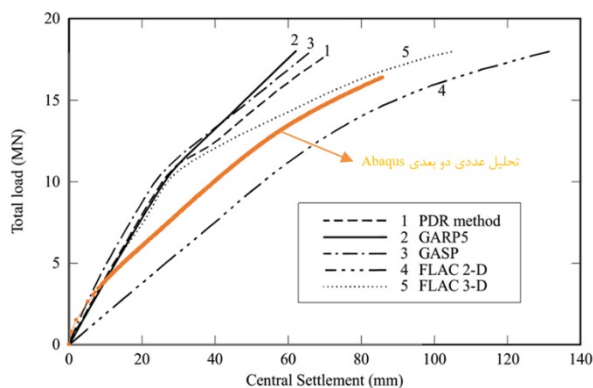
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک دانشگاه تربیت مدرس [saiedbaran@live.com](mailto:saiedbaran@live.com)

### مقدمه

پولوس<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۷ مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف تحلیل شالوده‌های مرکب رادیه-شمع انجام داد. در این بررسی‌ها از روش‌های PDR, GASP, GARP, Flac2D و Flac3D استفاده شده است. همانطور که در شکل (۱) مشخص است در اکثر روش‌ها روند نمودار تا بار ۱۰ مگانیوتون با یکدیگر مطابقت دارند، با این حال در روش Flac2D به دلیل فرض‌های ساده کننده در مدل کردن دو بعدی محیط نتایج متفاوتی نسبت به سایرین بدست می‌آید. در این مطالعه نیز برای صحت‌سنجی اولیه مدل‌سازی مدل‌های ساخته شده توسط پولوس به وسیله نرم افزار Abaqus ساخته شد و نتایج آن در شکل (۲) آورده شده است، که از دقت خوبی نسبت به نتایج کاری پولوس برخوردار است.



شکل (۱): نمودار بار-نشست سیستم شالوده مرکب رادیه-شمع از روش‌های مختلف تحلیلی

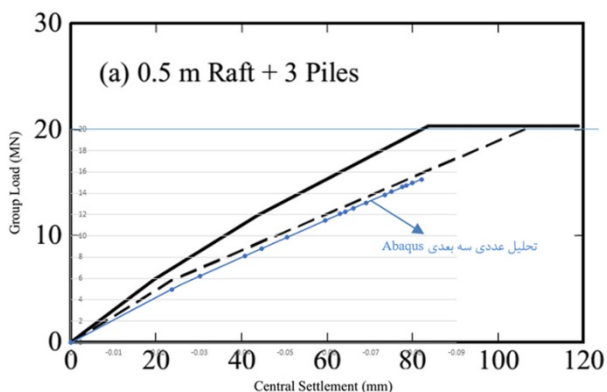


شکل (۲): نتایج مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی با نرم افزار Abaqus و مقایسه با نتایج پولوس (۱۹۹۷)

حین زلزله به دلیل اندرکنش دینامیکی بین رادیه، شمع‌ها و خاک نسبتاً پیچیده است، لذا مطالعه جامعی بر روی روند تحلیل

یکی از مؤثرترین راه‌های افزایش ظرفیت باربری رادیه و کاهش نشست سازه‌ها، استفاده از شمع می‌باشد. این سیستم به شالوده هیبرید یا شالوده رادیه-شمع مرکب (PRF) معروف است که اخیراً مطرح شده است. در سیستم‌های شالوده رادیه-شمع، روش طراحی با روش طراحی شالوده سنتی تفاوت دارد به طوری که فرض می‌شود بارها هم توسط رادیه و هم توسط شمع‌ها و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان در هر مورد تحمل می‌شود. در این سیستم اندرکنش‌های مختلفی وجود دارد. این اندرکنش‌ها عبارت‌اند از اندرکنش شالوده و گروه شمع، اندرکنش شالوده و خاک، اندرکنش شمع و خاک و اندرکنش شمع‌ها با یکدیگر. مزایای استفاده از پی‌های رادیه شمع نسبت به گروه شمع آزاد عبارتند از (همسلی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰):

- کاهش تعداد و طول شمع‌های مورد نیاز نسبت به حالت استفاده از گروه شمع.
- کاهش حداکثر نشست و نشست‌های تفاضلی پی‌های سطحی که در نهایت موجب بهبود سرویس پذیری آن‌ها می‌شود.
- کاهش هزینه اقتصادی به دلیل کاهش تنش‌های داخلی و لنگرهای خمشی در رادیه با آرایش بهینه شمع‌ها در زیر رادیه.
- افزایش باربری پی سطحی با توزیع بار بین رادیه و شمع‌ها



مطالعه بر روی مکانیزم باربری شالوده رادیه-شمع تحت بار افقی یا حین زلزله بسیار محدود است زیرا رفتار شالوده رادیه-شمع

و طراحی شالوده رادیه- شمع تحت بار جانبی انجام نشده است و محققین مختلف مطالعات پارامتریک انجام داده‌اند.

در مطالعاتی که اسلامی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) با مدل‌سازی عددی در نرم افزار المان محدود Abaqus انجام داده‌اند، خاک به صورت محیطی نیمه بی‌نهایت در نظر گرفته شده و برای جلوگیری از بازگشت امواج زلزله به درون مدل، در مرزها فنر و میراگر قرار گرفته و همچنین تنش‌های مؤثر افقی معادل اعمال شده است. از نتایج این بررسی‌ها می‌توان به کاهش ۱۸٪ جابه‌جایی افقی و ۵۴٪ لنگر خمشی حداکثر در سیستم پی رادیه شمع نسبت به گروه شمع اشاره کرد.

هوریکوشی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۳) تعدادی آزمایش میز لرزه بر روی شالوده رادیه- شمع واقع بر ماسه با استفاده از سانتی‌فیوژ ژئوتکنیکی انجام داده و اثر صلب بودن اتصال سر شمع بر روی رفتار دینامیکی با دو مدل رادیه شمع با اتصال گیردار و مفصلی را مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه نتایج بارگذاری دینامیکی با یافته‌های حاصل از آزمایشات بارگذاری افقی استاتیکی انجام شده مقایسه شد. از این مطالعات می‌توان دریافت، گیردار بودن اتصال سر شمع موجب سختی افقی بیشتر نسبت به اتصال مفصلی می‌شود، همچنین نسبت بار افقی حمل شده توسط شمع‌ها در حالت اتصال گیردار سر شمع بیشتر بوده که نشان می‌دهد سهم شمع‌ها در مقاومت افقی رادیه شمع در این مدل بیشتر است، و باید در نظر داشت تماس زیر رادیه با سطح خاک نقش بسیار مهمی در کاهش شتاب افقی، شیب و لنگرهای خمشی شمع‌ها داشته است.

از طرفی به صورت نسبی تعداد کم شمع‌ها می‌تواند عامل ایجاد لنگر خمشی زیاد و ترک خوردگی در رادیه، و همچنین تمرکز تنش محوری در سر شمع‌ها شود. در ناحیه‌هایی که از نظر لرزه‌ای فعال به حساب می‌آیند، در صورتی که شمع‌ها به صورت سازه‌ای به رادیه متصل شده باشند، نیروی برشی و لنگر واژگونی زیادی در نوک شمع تحت اثر نیروهای جانبی متناوب یا دینامیکی ایجاد می‌شود. در تمامی این موارد ظرفیت باربری پذیرفته شده توسط شمع‌ها بیشتر از اینکه به وسیله ظرفیت

پذیرش ژئوتکنیکی آن‌ها باشد به وسیله ظرفیت سازه‌ای شمع‌ها تحمل می‌شود. عکس العمل بین سر شمع‌ها با رادیه را می‌توان با منفصل کردن شمع‌ها از رادیه و ایجاد یک لایه فاصله انداز کاهش داد. شمع‌های غیر متصل بارها را به صورت غیر مستقیم تحمل می‌کنند و می‌توانند به عنوان مسلح کننده و یا سخت کننده خاک در نظر گرفته شوند. در برخی از پی‌های شمعی نوین از رادیه شمع به همراه یک لایه جدا کننده و فاصله انداز استفاده می‌شود، به عنوان مثال پل ریون آنتریون در یونان (پکر<sup>۳</sup>، ۲۰۰۴)، که شامل تعدادی لایه قائم برای بهبود مقاومت برشی خاک و به حداقل رساندن خطرات ناشی از نشست‌های غیر متقارن می‌باشد. قرار دادن یک لایه قابل انعطاف بین رادیه و سر شمع اجازه جابه‌جایی نسبی رو به پایین در خاک و شمع را می‌دهد، این امر باعث ایجاد اصطکاک منفی در بخش بالایی شفت شده و شمع‌های غیر متصل به عنوان مسلح کننده لایه‌های خاک ایفای نقش کرده و با قرار گرفتن در زیر رادیه ایجاد یک لایه سخت تر و مرکب می‌کنند. (وانگ<sup>۴</sup>، ۲۰۰۰)، لیانگ<sup>۵</sup> (۲۰۰۳ و ۲۰۰۶)، فیوراوانت<sup>۶</sup> (۲۰۱۱).

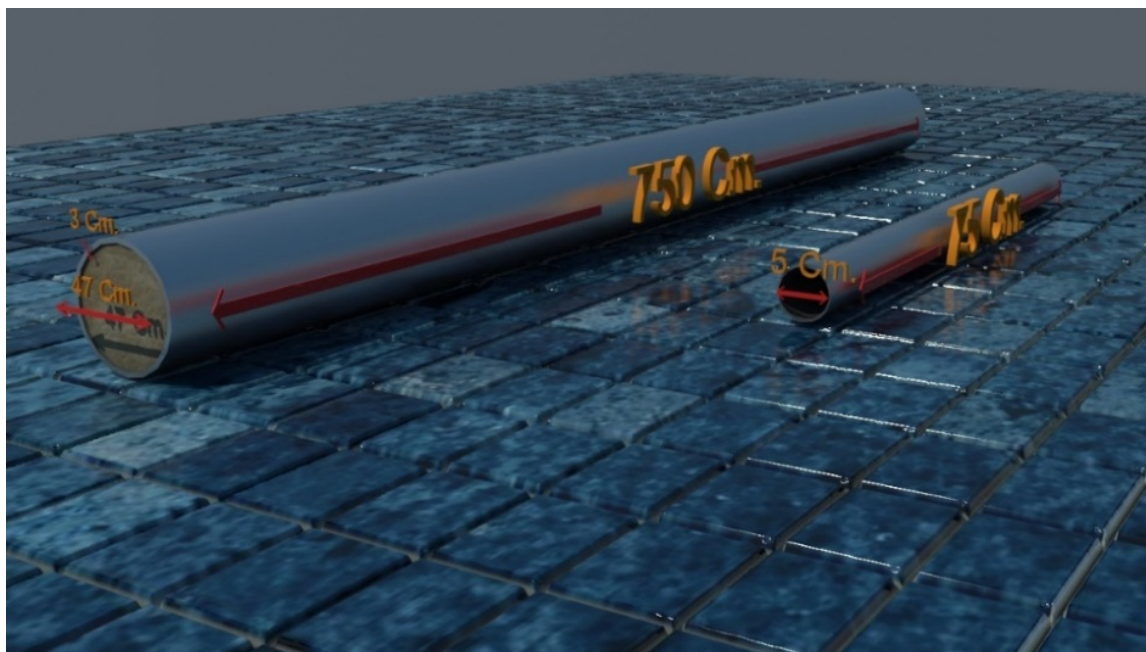
در مطالعاتی که ناکای<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۴) برای بررسی اثر شرایط اتصال بین رادیه و شمع‌ها بر رفتار دینامیکی سازه و اثر سیستم منفصل بر روی پی رادیه-شمع انجام دادند، چندین آزمایش بر روی مدل سانتی‌فیوژ و تعدادی تحلیل عددی انجام شد. از نتایج این مطالعات استنباط می‌شود که اختلاف بین اتصال گیردار و مفصلی در هر دو پی شمعی و رادیه-شمع بسیار اندک است. همچنین پی‌های رادیه-شمع دارای حدود ۵٪ برش پایه کمتر، ۱۲٪ لنگرهای واژگونی کمتر و ۲۰٪ شتاب کمتر نسبت به پی‌های شمعی است. این می‌تواند ناشی از اندرکنش بیشتر خاک-سازه در پی رادیه-شمع نسبت به پی شمعی باشد. در این مطالعات دیده شد که اگر شمع‌ها به رادیه متصل نباشند (RU)، پاسخ‌ها نسبت به رادیه شمع‌ها (PR) اندکی بیشتر خواهند بود و افزایش فاصله بین شمع‌ها و رادیه موجب افزایش لنگرهای واژگونی و شتاب و کاهش برش پایه در هر دو حالت استفاده یا عدم استفاده از شمع‌های کوتاه، شده است.

ضخامت ۳ میلی‌متر و طول ۷۵ سانتی‌متر استفاده شده که به صورت تو خالی و کوبشی درون خاک قرار گرفته است. مطابق شکل (۳)، این شمع‌ها از روی نمونه اصلی با قطر ۵۰ سانتی‌متر و طول ۷/۵ متر ساخته شد که شامل یک غلاف فلزی به ضخامت ۳ سانتی‌متر در اطراف شمع و هسته بتنی در بخش میانی است. رادیه در مدل آزمایشگاهی و عددی در سطح خاک بوده و سرشمع‌ها در حالت متصل در سطح خاک به رادیه متصل شد و در حالت منفصل یک لایه جدا کننده بین شمع‌ها و خاک قرار دارد. در جدول شماره (۱) اطلاعات آنالیز ابعادی شمع‌ها آورده شده است.

در این تحقیق به وسیله مدل‌سازی آزمایشگاهی بر روی دستگاه میز لرزه و سپس تحلیل عددی المان محدود به وسیله نرم افزار Abaqus تأثیر حالت متصل و منفصل بر روی عملکرد پی رادیه شمع بررسی شده و در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف نظیر سختی خاک، شتاب حداکثر موج ورودی و فرکانس موج بر لنگر خمشی شمع‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

### مدل‌سازی آزمایشگاهی

برای مدل‌سازی آزمایشگاهی از میز لرزه دانشگاه تهران استفاده شده است و خاک مورد آزمایش، ماسه فیروزکوه می‌باشد. برای مدل‌سازی شمع‌ها از لوله‌های آلومینیومی به قطر ۵ سانتی‌متر،



شکل (۳): مقایسه شمع‌ها در مدل ساخته شده به نمونه اصلی

جدول (۱): اطلاعات آنالیز ابعادی شمع‌های استفاده شده در مدل‌سازی آزمایشگاهی

ضریب فاکتور هندسی	طول شمع (Cm)	قطر شمع (Cm)	ضخامت شمع (Cm)	قطر داخلی (Cm)	مصالح	Es(Gpa)	Ee(Gpa)	I
						مدول الاستیسیته فولاد	مدول الاستیسیته بتن	
۱۰	۷۵۰	۵۰	۱,۵	۴۷	فولاد بتن	۲۰۰	۱۷	۶۷۲۳۱
محاسباتی	۷۵	۵	۰/۱۵	۴/۷	آلومینیوم	۶۹		۶,۷۲۳
مورد استفاده	۷۵	۵	۰/۱۵	۴/۷	آلومینیوم	۶۹		۶,۷۲۳
خطا	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰	۰			۰

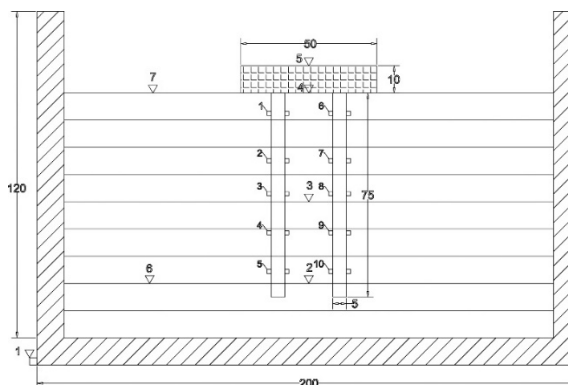
آزمایشگاهی بر روی مدل‌ها ۵ کرنش‌سنج بر روی بدنه هر یک از شمع‌ها، ۷ شتاب‌سنج در عمق‌های مختلف خاک و همچنین ۳ عدد LVDT بر روی نمونه قرار داده شد. در شکل شماره (۴) نحوه قرارگیری این ابزارها آورده شده است.

برای مدل‌سازی رادیه از یک مکعب آلومینیومی به ابعاد ۵۰×۵۰ سانتی‌متر و به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، از روی رادیه‌ای به ابعاد ۵\*۵ متر، ارتفاع ۱/۲ متر و از جنس بتن، ساخته شد. در جدول (۲) اطلاعات آنالیز ابعادی رادیه مورد استفاده در مدل‌سازی آزمایشگاهی تشریح شده است. برای اندازه‌گیری‌های

جدول (۲): اطلاعات آنالیز ابعادی رادیه مورد استفاده در مدل‌سازی آزمایشگاهی

ضریب فاکتور هندسی	I بتن	EI فولاد	EI بتن	EI مجموع	S	S/d	ضخامت پی	عرض پی	طول پی
۱۰	۲۳۹۴۰۹	۱۳۴۴۶۲۵۵	۱۶۲۷۹۸۴	۱۵۰۷۴۲۳۹	۲۰۰	۴	۱۲۰	۵۰۰	۵۰۰
				۴۷۶,۶۸۹۳	۲۰	۴	۱۲	۵۰	۵۰
				۴۶۳,۸۹۵۸	۲۰	۴	۱۰	۵۰	۵۰
				۲/۷	۰	۰	۱۶/۷	۰	۰

وسیله الک متحرکی با قابلیت تنظیم ارتفاع که بر روی میز لرزه تعبیه شده بود، انجام شد. این الک متحرک می‌توانست باعث تغییر ارتفاع ریزش خاک و در نتیجه تغییر در تراکم شود. در هر مرحله وزن مشخصی از خاک با توجه به وزن مخصوص خاک و ابعاد هر لایه در جعبه میز لرزه ریخته شد و سپس برای مشخص شدن مرز هر لایه، مقداری ماسه رنگی در مرز لایه‌ها ریخته شد. این ماسه‌های رنگی در تعیین میزان نشست هر لایه پس از بارگذاری کاربرد دارد. به منظور کاهش تأثیر برگشت موج در اطراف مدل به دلیل محدود بودن ابعاد میز لرزه و تفاوت با شرایط محیطی بی‌نهایت، در دو طرف مدل از لایه‌های ابری اسفنجی استفاده شد. بارگذاری لرزه‌ای اعمالی به سیستم به صورت سینوسی و توسط جک هیدرولیکی و در یک راستا اعمال شد. مقدار حداکثر شتاب وارده به سیستم متغیر بود ولی فرکانس



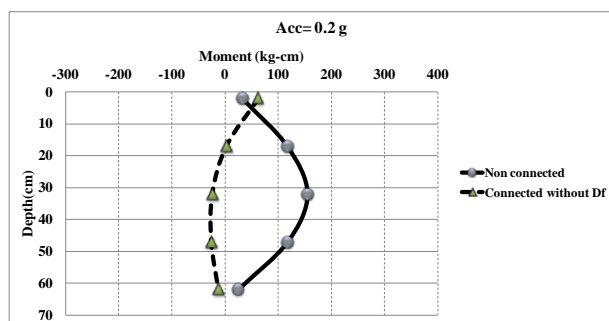
شکل (۴): محل قرارگیری سنسورهای موجود در مدل

بر روی بدنه میز لرزه نوارهایی به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر برای مشخص کردن لایه‌های خاک و تغییر شکل‌های مدل پس از اعمال نیروی لرزه‌ای، چسبانده شد. مرحله خاک‌ریزی برای رسیدن به خاکی نیمه‌تراکم به صورت پاششی انجام شد و به

جدول (۳): تغییر مکان افقی رادیه در حالت متصل و منفصل

شتاب	تغییر مکان افقی منفصل	تغییر مکان افقی متصل	درصد اختلاف
0.2g	0.73	0.45	38.36
0.4g	3.2	2.4	25.00

در شکل (۷) نیز مقایسه نتایج این بارگذاری بین حالت‌های متصل و منفصل در شتاب  $0.2g$  آورده شده است.



شکل (۷): نمودار لنگر خمشی شمع‌ها به عمق آن در شتاب  $0.2g$

همانطور که از شکل‌های (۶) و (۷) مشخص است حداکثر لنگر در حالت متصل در بخش سر شمع‌ها می‌باشد، در حالی که در حالت منفصل این مقدار در میانه شمع‌ها رخ می‌دهد. از طرفی در شتاب‌های بالاتر لنگر حداکثر حالت متصل از حالت منفصل بیشتر است ولی جابه‌جایی حالت منفصل از حالت متصل بیشتر بوده و باید برای کنترل آن تدابیر خاصی در نظر گرفته شود.

#### مدل‌سازی عددی در نرم افزار المان محدود

برای مدل‌سازی شرایط آزمایشگاهی از نرم افزار المان محدود Abaqus که امکان تحلیل سه‌بعدی و دوی بعدی مدل‌های پیچیده را دارد استفاده شده است. با توجه به اینکه شرایط قرارگیری شمع‌ها در مدل و همچنین شرایط اندرکنشی بین آنها که از حالت‌های تنش صفحه‌ای یا کرنش صفحه‌ای پیروی نمی‌کند؛ برای دقت بالاتر در نتایج، مدل‌سازی سه بعدی محیط ضرورت داشت.

در ابتدا برای مدل‌سازی محیط خاکی موجود، یک شی محیط پیوسته سه‌بعدی به عنوان بستر خاکی در نظر گرفته شد و محل شمع‌ها در این شی مشخص و حفاری شد. در شکل شماره (۸) مدل عددی محیط خاکی ساخته شده به همراه مش‌بندی آن نشان داده شده است.

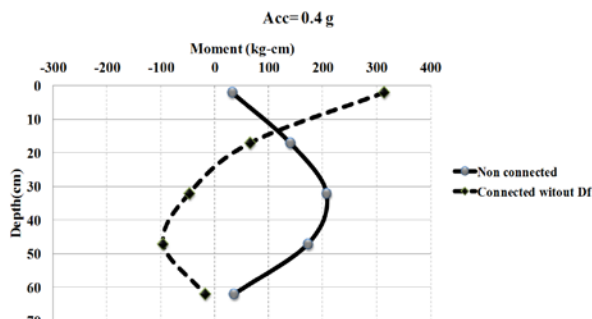
بارگذاری بر روی مقدار  $7$  هرتر ثابت نگه داشته شد. در شکل (۵) جعبه میز لرزه پر شده نشان داده شده است. در حالت شمع‌های منفصل از رادیه، آزمایش‌ها در دو بخش، شامل یک لایه  $15$  سانتی‌متری فاصله انداز شنی و در حالت دیگر با لایه فاصله انداز به همان ضخامت و با جنس ماسه، که فضای بین شمع‌ها و رادیه را دربر می‌گرفت، انجام شد.



شکل (۵): جعبه میز لرزه پر شده از ماسه فیروزکوه به همراه رادیه و شمع

#### نتایج آزمایشگاهی

با توجه به دو مورد بارگذاری با شتاب‌های حداکثر  $0.2g$  و  $0.4g$  لنگر وارده به شمع‌ها در طول شمع مطابق شکل (۶) است. همچنین مقادیر جابه‌جایی رادیه در دو حالت متصل و منفصل نیز در جدول (۳) آورده شده است.

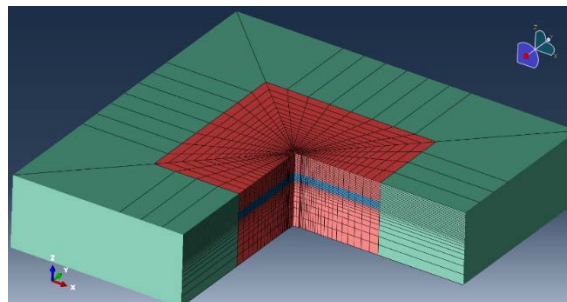


شکل (۶): نمودار لنگر خمشی شمع به عمق آن در شتاب  $0.4g$

برای مدل‌سازی این اعضا از المان محیط پیوسته سه بعدی برای شمع‌ها و المان پوسته‌ای سه بعدی برای رادیه استفاده شد. تعداد گام‌های تحلیلی ایجاد شده برای مدل‌سازی پنج گام است که به ترتیب به ایجاد تنش‌های اولیه در مدل، حفاری و قرارگیری شمع‌ها، فعال کردن اصطکاک شمع‌ها، اعمال بار وزن رادیه بر روی آن و در نهایت گام تحلیل دینامیکی می‌باشد. با توجه به وجود مصالحی مانند آلومینیوم که اختلاف سختی قابل ملاحظه‌ای با مصالح خاکی دارند استفاده از تحلیل صریح<sup>۱</sup> زمان تحلیل را به شدت افزایش خواهد داد از این رو نوع تحلیل ضمنی<sup>۲</sup> برای این مدل به کار گرفته شده است.

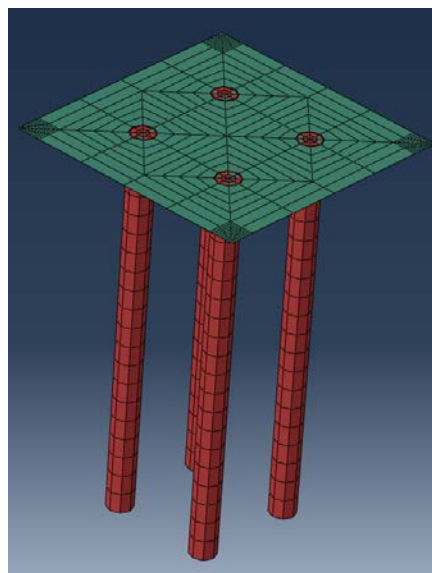
اندرکنش‌های بین رادیه و شمع‌ها در حالت مدل‌سازی متصل به صورت اتصال کامل مدل شد. همچنین اندرکنش‌های بین جداره و نوک شمع با خاک از نوع اصطکاکی برای اندرکنش مماسی و از نوع اتصال سخت برای اندرکنش عمود بر سطح تعریف شد. از سویی از امکان جدایی سطوح بعد از اتصال جلوگیری به عمل آمد که این امر موجب سهولت در گام‌های تحلیل شد. اندرکنش رادیه و خاک نیز به صورت مشابه، همانند اندرکنش شمع‌ها با محیط خاکی بوده و به صورت قائم و اصطکاکی در نظر گرفته شد. مجموعه این اندرکنش‌ها شبیه‌سازی نسبتاً کاملی از شرایط موجود در آزمایشگاه را به همراه داشت، برای معرفی اصطکاک بین قطعات از ضریب اصطکاک بین جداره آلومینیومی و سطح خاک استفاده شد.

در ادامه، نیروی جاذبه به مدل اعمال شد؛ همچنین نیروی دینامیکی سینوسی به صورت جابه‌جایی به کف مدل وارد شد، در حالی که در دو راستای دیگر بخش تحتانی دارای قیود کامل حرکتی می‌باشد، با آزاد گذاشتن راستای اعمال نیروی لرزه می‌توان شبیه‌سازی ورود نیروی میز لرزه را انجام داد. از طرفی باید در نظر داشت که برای جلوگیری از برگشت امواج ناشی از برخورد به انتهای مدل ساخته شده یا باید محیط را به اندازه‌ای بزرگ انتخاب کرد که احتمال رخ دادن این اتفاق به شدت کاهش یابد یا از مرزهای جاذب و سایر روش‌های جذب موج استفاده شود، که در این مدل به وسیله ایجاد محیط بی‌نهایت این امر صورت گرفته است. برای مش بندی المان‌ها از المان سه بعدی خطی استفاده شده است و المان‌های شمع با



شکل (۸): مدل عددی محیط خاکی ساخته شده به همراه مش بندی آن

برای تعیین رفتار محیط خاکی مدل رفتاری حالت پلاستیک موهر- کولمب با زاویه اصطکاک داخلی ۳۶ درجه و به دلیل وجود ماسه خالص استفاده از مقدار اندکی به عنوان چسبندگی و شرایط الاستیکی با مشخصات مدول الاستیسته ۲۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ به کار گرفته شد. در شکل شماره (۹) نمایی از مدل خاک مورد استفاده به همراه مش زنی مربوطه نشان داده شده است.

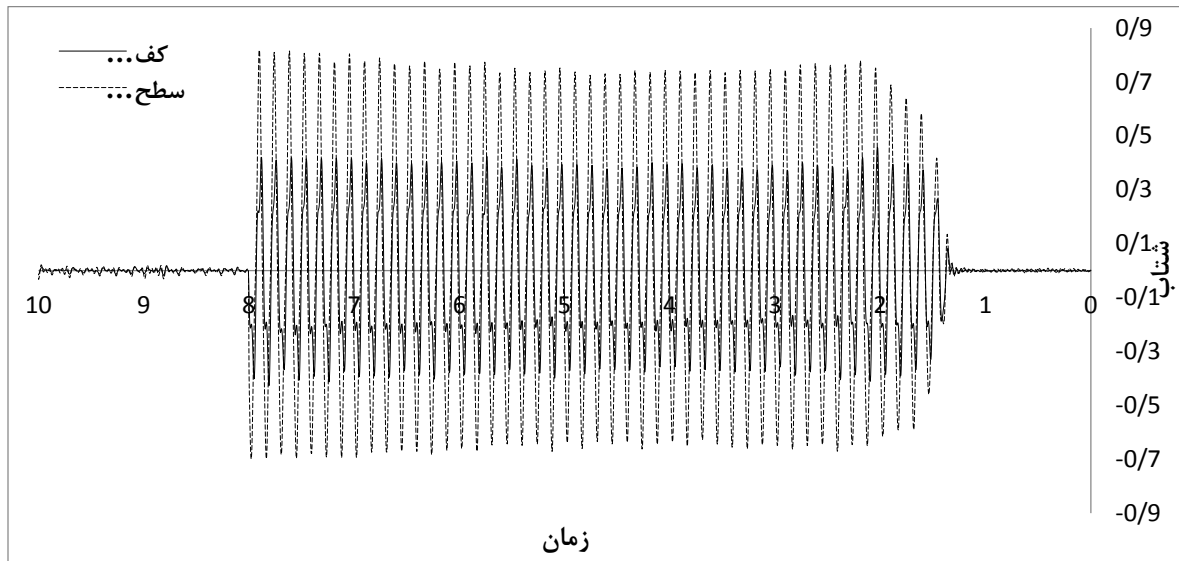


شکل (۹): مدل عددی شمع‌ها به همراه رادیه و مش بندی آن

در ادامه برای مدل‌سازی شمع‌ها و رادیه از یک ماده که تنها رفتار الاستیک آنها را در نظر می‌گیرد بهره گرفته شد. مشخصات الاستیک این مواد نیز مشخصات رایج برای آلومینیوم می‌باشد. از طرفی از وزن قطعات آلومینیومی صرف‌نظر شده و تنها به عنوان بار رادیه به صورت مجزا و به صورت نیروی فشاری بر روی رادیه قرار گرفته است.

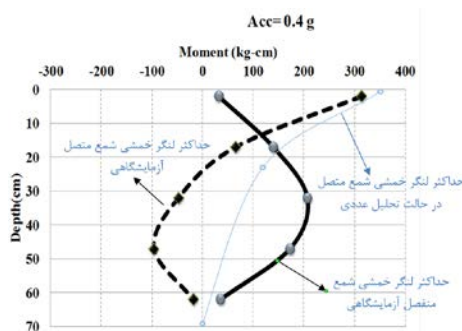


قابلیت **Incompatible mode** برای ایجاد شرایط مناسب در شکل شماره (۱۰) بار سینوسی وارده در کف مدل با فرکانس ۷ هرتز و شتاب حداکثر  $0.4g$  و همچنین خروجی شتاب بر روی سطح مدل آورده شده است.



شکل (۱۰): شتاب در کف مدل و بر روی سطح خاک در حالت شتاب حداکثر  $0.4g$

در عملکرد شمع‌های متصل به رادیه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. همانگونه که در شکل شماره (۱۴) مشخص است با افزایش سختی خاک تغییر زیادی در مقدار حداکثر لنگر خمشی به وجود آمده در شمع‌ها مشاهده نمی‌شود، در حالی که تأثیر نیمه بالایی شمع‌ها در روند باربری خمشی به شکل قابل توجه افزایش یافته است.



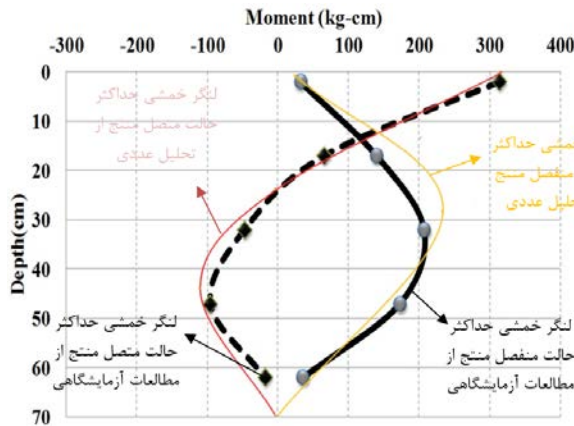
شکل (۱۱): مقایسه لنگر خمشی در حالت شمع‌های متصل برای مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی

### نتایج مدل‌سازی عددی

در ابتدا شرایط خاک با فرض خاک تک لایه در شرایط شتاب حداکثر  $0.4g$  برای شمع‌ها در حالت متصل و منفصل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج این تحلیل می‌توان برداشت کرد مقدار حداکثر لنگر خمشی در حالت متصل تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، اما روند کلی این نمودار از مود اول تغییر شکل سازه‌ها تبعیت می‌کند در حالی که در شرایط آزمایشگاهی چنین نیست. از طرفی برای حالت منفصل، روند کلی نمودار تطابق خوبی با روند آزمایشگاهی دارد، در حالی که مقدار آن متفاوت از شرایط آزمایشگاهی است. در شکل شماره (۱۱) لنگر خمشی حداکثر حاصل از تحلیل عددی در حالت شمع‌های متصل به رادیه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آورده شده است. در شکل شماره (۱۲) نتایج حالت منفصل در شرایط آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج حاکی از اختلاف ۳۰٪ بین حداکثر لنگر خمشی در حالت متصل و منفصل است. همچنین تأثیر تغییرات شتاب حداکثر روی عملکرد خمشی شمع‌ها در شکل شماره (۱۳) مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان نتیجه گرفت با افزایش شتاب حداکثر لنگر خمشی حداکثر در شمع‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش سختی خاک و افزایش مدول الاستیسته خاک تأثیر این پارامتر

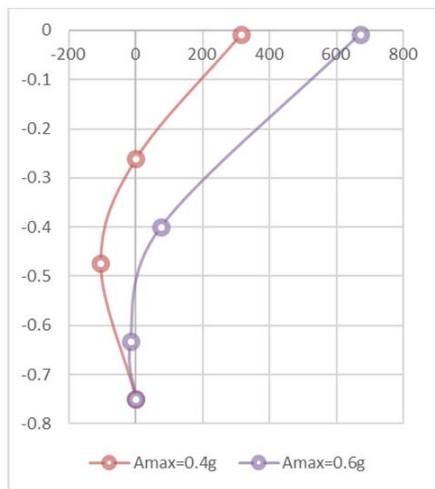


از این رو مدل‌سازی عددی با فرض خاک دو لایه شامل یک لایه با سختی کمتر و یک لایه با سختی بیشتر انجام گرفت. نتایج این تحلیل از تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. در شکل (۱۵) نتایج تحلیل عددی با فرض خاک دو لایه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای حالت شمع‌های متصل به رادیه و منفصل از آن، ارائه شده است.



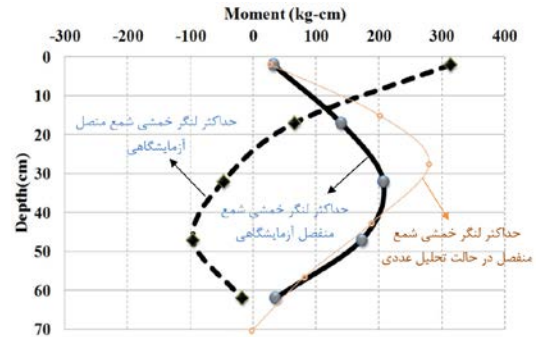
شکل (۱۵): مقایسه نتایج تحلیل عددی و مدل‌سازی آزمایشگاهی برای شمع‌های متصل به رادیه و منفصل از آن در حالت خاک دو لایه

همچنین تأثیر افزایش و کاهش شتاب حداکثر بر روی عملکرد این شمع‌ها در حالت متصل در شکل (۱۶) مورد بررسی قرار گرفت و همانگونه که در شکل مشخص است با افزایش شتاب مقدار حداکثر لنگر خمشی افزایش یافته و از سهم نیمه پایینی شمع‌ها در باربری خمشی کاسته شده است.

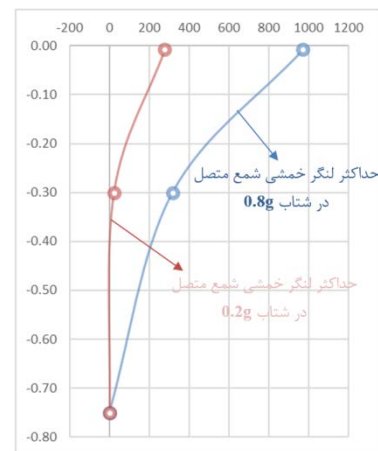


شکل (۱۶): لنگر خمشی حداکثر در حالت شمع‌های متصل به رادیه در خاک دو لایه برای شتاب حداکثر 0.4g و 0.6g

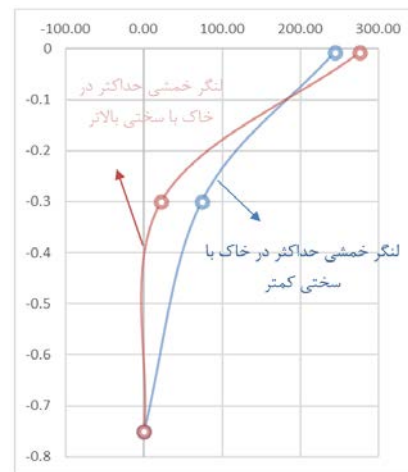
تأثیر افزایش و کاهش فرکانس بارگذاری نیز بر روی عملکرد شمع‌ها در شکل شماره (۱۷) مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل (۱۲): مقایسه لنگر خمشی در حالت شمع‌های منفصل برای مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی



شکل (۱۳): لنگر خمشی حداکثر در حالت شمع‌های متصل به رادیه برای شتاب 0.2g و 0.8g



شکل (۱۴): تأثیر تغییرات سختی بر لنگر خمشی حداکثر در حالت شمع‌های متصل به رادیه

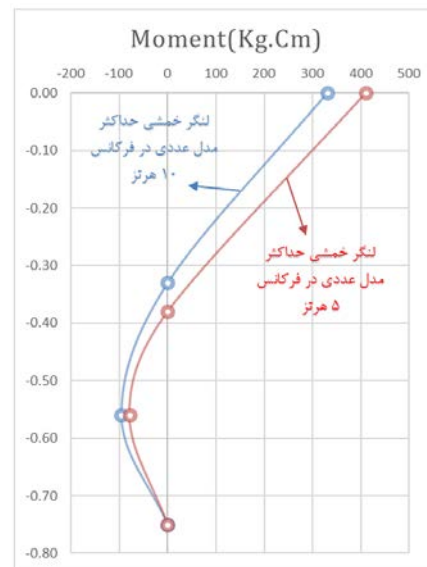
در ادامه با توجه به شرایط مدل‌سازی آزمایشگاهی و به دلیل استفاده از سیستم بارش برای خاک‌ریزی درون جعبه آزمایش و همچنین اجرای کوبشی شمع‌ها درون محیط خاکی، انتظار می‌رفت که خاک اطراف و زیر شمع‌ها با افزایش سختی مواجه شود.

این در حالی است که مشخصات خاک پیرامونی به شدت بر روی عملکرد شمع‌های منفصل تأثیرگذار است.

### مراجع

- 1- Eslami, M. M., Aminikhah, A. and Ahmadi, M. M. (2011). "A comparative study on piled group and piled raft foundations (PRF) behavior under seismic loading." *Computational Methods in Civil Engineering*, 2(2), 185-199.
- 2- Fioravante, V. (2010). "Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer." *Géotechnique*, 61(2), 121-132.
- 3- Horikoshi, K., Matsumoto, T., Yashizume, Y., Watanabe, T. and Fukuyama, H. (2003). "Performance of piled raft foundations subjected to static vertical loading and horizontal loading." *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 3(2), 37-50.
- 4- Liang, F. Y., Chen, L. Z. and Shi, X. G. (2003). "Numerical analysis of composite pile raft with cushion subjected to vertical load." *Computers and Geotechnics*, 30(6), 443-453.
- 5- Liang, F., Li, J. and Chen, L. (2006). "Optimization of composite piled raft foundation with varied rigidity of cushion." *Foundation Analysis and Design*, 29-34.
- 6- Nakai, S., Kato, H., Ishida, R., Mano, H. and Nagata, M. (2004). "Load bearing mechanism of piled raft foundation during earthquake." *Proceedings Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction*, March 29-30, 2004, Menlo Park, California, USA.
- 7- Pecker, A. (2004). "Design and construction of the Rion Antirion Bridge." *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, 154(7), 216-240.
- 8- Poulos, H. (1997). "Comparison of some methods for analysis of piled rafts." in *Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering-international society for soil mechanics and foundation engineering*.
- 9- Wong, I. C. (2000). "Raft foundations with disconnected settlement-reducing piles." *Design application of raft foundations*, 469-486.

همانگونه که از نمودارها مشخص است، با کاهش فرکانس بارگذاری لنگر خمشی حداکثر در شمع‌ها افزایش یافته، در حالی که با افزایش فرکانس بارگذاری تأثیر چندانی در این مقدار دیده نمی‌شود.



شکل (۱۷): لنگر خمشی حداکثر در شمع‌های متصل به رادیه در فرکانس ۵ و ۱۰ هرتز

### نتیجه گیری

- با بررسی‌هایی که بر روی شمع‌های متصل و منفصل در حالت لرزه‌ای صورت گرفته است می‌توان انتظار داشت به صورت کلی جابه‌جایی حداکثر ایجاد شده در حالت منفصل از حالت متصل بیشتر بوده که این جابه‌جایی را می‌توان با مدفون کردن رادیه در خاک تا حدی کاهش داد.
- لنگر حداکثر ایجاد شده در حالت متصل بیشتر از حالت منفصل بوده که در نتیجه نیاز به طراحی شمع‌هایی با مقاطع بزرگتر در حالت متصل ضروری است. با این حال باید در نظر داشت که لنگر حداکثر در حالت متصل در سر شمع و در حالت منفصل در میانه شمع ایجاد می‌شود.
- تأثیر نحوه اجرا بر عملکرد شمع‌ها در حالت متصل و منفصل قابل توجه است به طوری که در صورت اجرای کوبشی شمع‌های متصل باید اثر متراکم شدن لایه‌های پایین‌تر خاک و اطراف شمع در مدل‌سازی لحاظ شود.
- شمع‌های متصل به دلیل عملکرد سازه‌ای خود، نسبت به شمع‌های منفصل که بیشتر به عنوان مسلح کننده عمل می‌کنند، کمتر تحت تأثیر مشخصات خاک اطراف قرار دارند،