

## تحلیل لرزه‌ای گروه شمع ناشی از اندرکنش کینماتیکی غیرخطی خاک و شمع

مجید شبخوان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد بوشهر، ایران  
majidshabkhan@gmail.com

حسین تحقیقی

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه کاشان، ایران  
tahghighi@kashanu.ac.ir

کلید واژه‌ها: تحلیل لرزه‌ای غیرخطی، گروه شمع، اندرکنش کینماتیکی، خاک لایه‌ای

### چکیده

هنگام زلزله اثرات اندرکنش کینماتیکی خاک-شمع علاوه بر تغییر در حرکت میدان آزاد زمین، با وارد نمودن انحنا و تغییر شکل‌های جانبی از طرف خاک به شمع، باعث گسیختگی شمع‌ها در اعماق زمین می‌شود. با توجه به پیچیده بودن تحلیل پدیده اندرکنش کینماتیکی در خاک‌های لایه‌ای، نیاز به استفاده از روش‌های عددی برای تحقیق و تعیین بارهای طراحی گروه شمع‌ها را روشن می‌کند. در این مقاله از مدل اجزا-ی محدود سه بعدی توسط نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل لرزه‌ای گروه شمع‌ها واقع در دو لایه خاک با رفتار غیرخطی استفاده شده است. بدین منظور از مدل دراگر-پراگر سخت‌شونده برای بیان رفتار غیرخطی خاک و از المان‌های نامحدود برای جلوگیری از برگشت امواج لرزه‌ای به درون سیستم خاک - شمع و اثر جعبه‌ای استفاده می‌شود. ابتدا صحت نتایج مدل عددی برای شمع منفرد تحت بارگذاری استاتیکی با نتایج آزمایشگاهی و نیز روش عددی وینکلر مورد ارزیابی قرار گرفته و مشاهده می‌شود که مدل به کار رفته قادر به پیش‌بینی قابل قبول پاسخ‌ها می‌باشد. سپس اثرات اندرکنش کینماتیکی خاک - شمع روی نیروهای داخلی گروه شمع‌ها واقع در محیط خاک لایه‌ای بررسی می‌گردد. انجام مطالعات پارامتری در خصوص عوامل موثر در تغییرات نیروهای کینماتیکی شامل نسبت فاصله به قطر شمع و تعداد شمع‌ها در گروه نشان می‌دهد که روش عددی مذکور قابلیت خوبی برای بررسی نیروهای کینماتیکی لرزه‌ای در گروه شمع‌ها را نیز دارد.

### مقدمه

شمع‌ها عضو سازه‌ای چوبی، بتنی و فولادی است که برای انتقال بارهای سطحی به تراز پایین‌تر توده‌ی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند و کاربرد آنها در زیر سازه‌های مهمی همچون تجهیزات نیروگاهی، مجتمع‌های پتروشیمی، سازه‌های دریایی و پل‌ها که تحت اثر ارتعاشات حاصل از امواج زلزله قرار دارند، محققین را متوجه لزوم بررسی رفتار دینامیکی شمع‌ها کرده است. این مساله فرآینده بسیار پیچیده‌ای است که مستلزم بررسی پدیده‌هایی همچون اندرکنش کینماتیکی خاک - شمع و اندرکنش اینرسی شمع - سازه می‌باشد و در طراحی مناسب سازه‌ها و پی‌های آنها، باید هر دو این اثرات به طور دقیق محاسبه شوند. در گذشته طراحی لرزه‌ای شمع‌ها بدون در نظر گرفتن نیروهای کینماتیکی، توسط نیروهای اینرسی بدست آمده از تحلیل دینامیکی روسازه صورت می‌پذیرفت. این روند باعث افزایش سرعت محاسبات و همچنین افزایش سهولت مدل کردن مساله و فرضی محافظه‌کارانه‌ای تلقی می‌شد. ولی با بررسی خسارات و خرابی شمع‌ها در زلزله‌های اخیر و نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام شده روی مدل‌های فیزیکی، مشاهده شد که نیروهای کینماتیکی می‌تواند سهم قابل توجهی در خسارت‌های ایجاد شده در فونداسیون شمع‌ها در اعماق زمین داشته باشد و نایبستی در تحلیل‌ها از آن چشم‌پوشی شود. این مشاهدات موجب شد تا محققین به مطالعات و تحقیقات دقیقتری در زمینه نقش اندرکنش کینماتیکی در طراحی شمع بویژه در خاک‌های لایه‌ای پرداخته و روش‌های تحلیلی و عددی گوناگون در این خصوص پیشنهاد شود.

به طور کلی بسیاری از تحقیقات گذشته پیرامون تحلیل اندرکنش کینماتیکی خاک و شمع با استفاده از روش‌های نیمه تحلیلی و یا وینکلر در حالت رفتار الاستیک خاک انجام شده است (Dezi et al., 2009; Nikolaou et al., 2001). لیکن باید توجه نمود که در اثر زلزله‌های شدید رفتار غیرخطی خاک در فصل مشترک خاک و شمع اثرات زیادی بر روی پاسخ شمع‌ها داشته و باید در تحلیل مدنظر قرار گیرد. در این

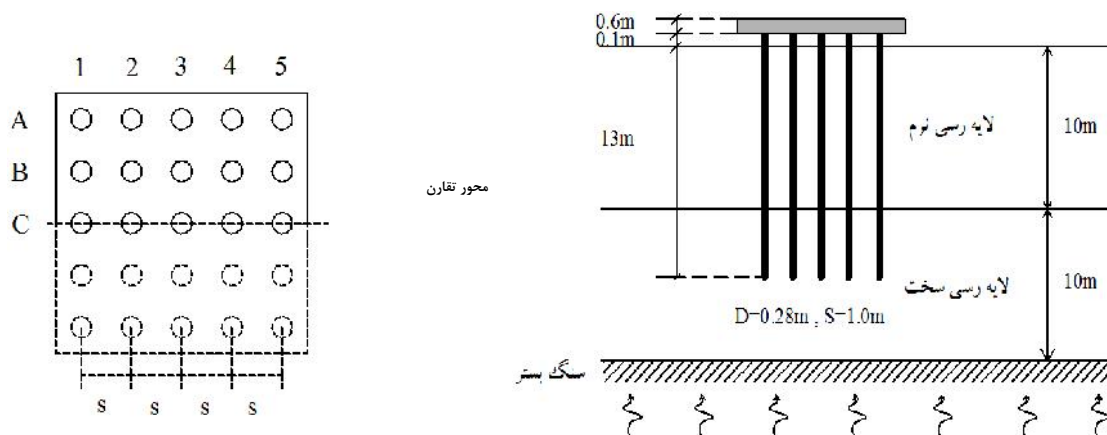


زمینه، مطالعاتی با استفاده از روشهای عددی وینکلر و اجزای محدود به صورت تاریخچه زمانی انجام گردید تا بتوان اثر غیرخطی بودن خاک را در مدل بررسی نمود (Rajib and Maheshwari, 2008; Wu and Finn, 1997). لازم به ذکر است که در این مطالعات، محاسبه نیروهای ناشی از اندرکنش کینماتیکی به سرشمعها محدود شده است و تحقیقات اندکی در ارتباط با برآورد این نیروها در امتداد شمعها به بحث پرداخته‌اند (Maiorano et al., 2007 و شبخوان و همکاران، ۱۳۹۳).

در این مقاله، اثرات اندرکنش کینماتیکی خاک - شمع روی نیروهای داخلی در امتداد گروه شمعها واقع در دو لایه خاک تحت بارهای زلزله، با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح خاک تشریح می‌شود. برای تحلیل دینامیکی از مدل اجزای محدود سه بعدی توسط نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است تا دقت و توانایی این روش در بررسی این نوع نیروها مشخص گردد. سپس با انجام مطالعات پارامتری عوامل موثر در تغییرات نیروهای کینماتیکی در مقاطع گروه شمعها شامل نسبت فاصله به قطر شمع و تعداد شمعها در گروه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## تشریح مساله

زمانی که چند شمع انعطاف‌پذیر در مجاورت همدیگر در بستری از خاک قرار می‌گیرند اثرات گروه بر روی رفتار شمع باعث می‌شود فشارهای خاک در بین شمعها با یکدیگر همپوشانی داشته باشد و نیروی ایجاد شده در هر یک از شمعهای گروه نسبت به نیروی شمع منفرد کاهش یابند. چنین فرآیندی در قالب پدیده اندرکنش شمع - خاک - شمع مورد توجه بسیاری از دانشمندان و محققین بوده است. هدف مطالعه حاضر، بررسی این نیروهای کینماتیکی در گروه شمعها واقع در خاکهای لایه‌ای تحت حرکات جانبی زمین ناشی از انتشار امواج زلزله می‌باشد. برای بررسی این موضوع، مطابق شکل ۱ از یک گروه شمع ۵×۵ به قطر ۰.۲۸ متر، طول ۱۳ متر با ۰.۱ متر بیرون زدگی از سطح زمین و نسبت فاصله به قطر برابر ۳.۶ و پروفیل خاکی به ضخامت ۲۰ متر در دو لایه مساوی از رس نرم و سخت روی بستر سنگی استفاده می‌شود. شمعها توسط کلاهک فولادی به ابعاد ۵×۵ متر و ضخامت ۰.۶ متر به یکدیگر متصل می‌باشند. جدول ۱ خصوصیات مصالح مصرفی خاک و شمع را نشان می‌دهد. برای تحلیل دینامیکی، تحریک لرزه‌ای به صورت گذرا در کف توده خاکی اعمال می‌گردد. بدین منظور از مولفه افقی زلزله طیس در سال ۱۹۷۸، ثبت شده در ایستگاه Dayhook با حداکثر شتاب ۰.۳۳ g، زمان تناوب غالب برابر ۰.۱۹۵ ثانیه استفاده و به مدت ۲۴ ثانیه به گره‌های واقع در کف مدل در جهت محور x اعمال می‌شود.



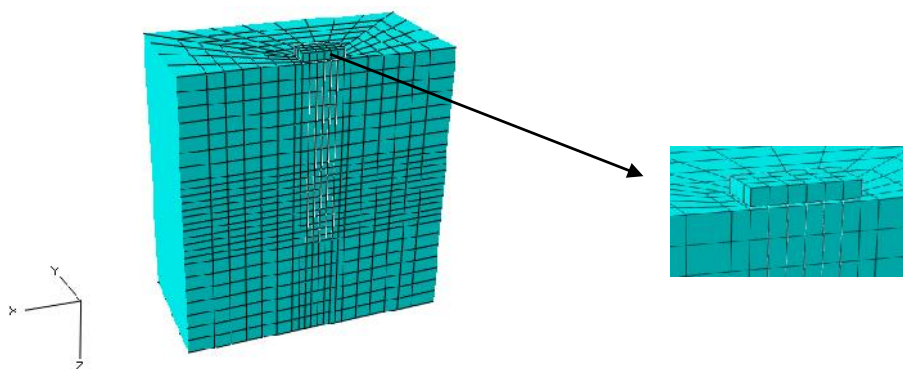
شکل ۱: مدل قرارگیری گروه شمع ۵×۵ در پروفیل خاک دو لایه

جدول ۱: خصوصیات مصالح خاک و شمع

سرعت موج برشی $V(\frac{m}{s})$	ضریب میرایی $\xi$	چگالی $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون $\nu$	زاویه اصطکاک $\phi$ (deg)	زاویه اتساع $\psi$ (deg)	مدول ارتجاعی E (Mpa)	مصالح	جز مدل
۱۲۶	۰.۰۵	۲۱۰۰	۰.۴۹	۰	۰	۱۰۰	رس نرم	خاک لایه اول
۸۰۰	۰.۰۲	۲۵۰۰	۰.۴	۰	۰	$4.48 \times 10^3$	رس سخت	خاک لایه دوم
—	—	۷۱۰۰	۰.۳	—	—	$2.1 \times 10^5$	فولادی	شمع و کلاهک

## مدل اجزاء محدود

در این تحقیق، برای مدل‌سازی سیستم خاک - شمع از برنامه ABAQUSE 6.9.3 استفاده شده است. شبکه اجزاء محدود به کار رفته مطابق شکل ۲، شامل یک مدل سه بعدی به ابعاد ۲۰ متر با المان‌های مکعبی ۸ گرهی برای مدل خاک می‌باشد که در کناره‌ها از المان نامحدود استفاده شده است. با توجه به محدودیت موجود از نظر زمان محاسبات، مش‌بندی به گونه‌ای انجام شده است که از یک سو زمان محاسبات بسیار طولانی نگردد و از سویی دیگر دقت لازم در نتایج فراهم گردد. در مدل عددی، ابعاد المان‌های خاک در نزدیکی شمع کوچک نگه داشته و با دور شدن از شمع ابعاد المان افزایش می‌یابد. در راستای قائم نیز ابعاد المان‌ها در نزدیکی مرز مشترک جدایی لایه‌ها ریز و در دیگر اعماق درشت و ثابت نگه داشته شده است. با توجه تقارن مدل نسبت به محور موازی با جهت نیروی جانبی وارده به سیستم (محور x)، نصف مدل در نظر گرفته می‌شود و درجات آزادی در جهت عمود بر صفحه تقارن گیردار می‌باشد. همچنین از مدل رفتاری دراگر - پراگر سخت‌شونده برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک استفاده شده است.



شکل ۲: شبکه اجزای محدود سه بعدی سیستم خاک - گروه شمع ۵×۵

مدل کردن سطح تماس خاک و شمع یکی از قسمت‌های مهم در اندرکنش خاک - شمع می‌باشد. عموماً سطح تماس بین شمع و خاک به صورت کاملاً به هم چسبیده و یا به شکل سطح تماس اصطکاکی که امکان لغزش و نیز جدا شدن بین خاک و شمع وجود داشته باشد در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، از المان الاستیک Beam برای مش‌بندی شمع استفاده شده و در حالت تماس کامل به گره‌های المان‌های خاک متصل شده است. از نظر شرایط مرزی، قسمت سر شمع‌ها در برابر دوران گیردار می‌باشد. همچنین از المان‌های مکعبی ۸ گرهی برای مش‌بندی کلاهک شمع استفاده شده است.

میرایی سیستم متشکل از میرایی داخلی مصالح و میرایی هندسی می‌باشد. میرایی مصالح در اثر عبور امواج ارتعاشی در داخل خاک به وجود می‌آید و می‌توان آن را عامل اتلاف انرژی در اثر پسماند (Hysteresis) در خاک دانست که به صورت میرایی رایلی در سیستم اعمال می‌گردد. اما میرایی هندسی عامل اتلاف انرژی در اثر پخش امواج از پی سازه به اطراف تا محدوده نیمه بی‌نهایت است. در این حالت، مدل‌سازی شرایط مرزی در کناره‌های مدل خاک بایستی به گونه‌ای صورت گیرد تا از برگشت امواج لرزه‌ای به داخل مدل و اثر جعبه‌ای جلوگیری شود. بنابراین برای اعمال شرایط مرزی دینامیکی از مرزهای جاذب (Quiet Boundary) استفاده شده است. این مرز از قابلیت نرم‌افزار بوده و سبب جلوگیری از انعکاس امواج اضافی به خاک می‌شود. برای استفاده از این مرزها، در اطراف مدل از المان‌های نامحدود استفاده می‌گردد. با فرض قرار گرفتن لایه خاک بر روی سنگ بستر، شرایط انتهایی مدل در سه جهت بسته شده‌اند.

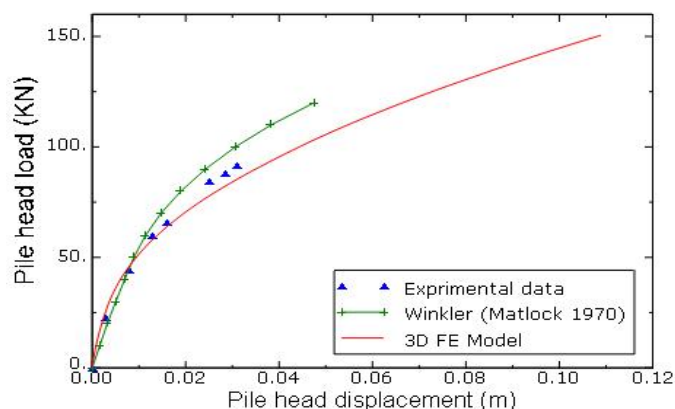
## ارزیابی مدل عددی

برای بررسی ارزیابی مدل، از مشخصات خاک و شمع منفرد به کار رفته در تحقیقات آزمایشگاهی که توسط Blaney and O'Neill (1986) در دانشگاه Houston انجام گردید، استفاده شده است و نتایج تحلیل استاتیکی مدل سه بعدی با نتایج حاصل از آزمایش و نیز روش وینکلر (Matlock, 1970) مقایسه می‌شوند.

مدل تحلیلی شامل یک شمع منفرد با سر بصورت آزاد به طول ۱۳ متر با ۰.۱ متر بیرون زدگی از سطح زمین و قطر ۰.۲۸ متر و خاک رس نرم با مشخصات مطابق جدول ۱ می‌باشند. تحلیل استاتیکی با اعمال بار جانبی به سر شمع انجام گرفته و تغییر مکان ایجاد شده تحت بار وارده کنترل می‌شود. در این تحقیق از مدل تماس سطح به سطح با خصوصیات رفتاری از نوع تماس سخت و بدون اصطکاک برای مدل کردن سطح تماس خاک و شمع استفاده می‌شود. رفتار غیرخطی خاک توسط مدل دراگر-پراگر سخت شونده در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳،



تغییر مکان سر شمع در مقابل اعمال نیروی استاتیکی برای مدل مورد مطالعه به کمک سه روش متفاوت مذکور مقایسه شده است. همانطور که شکل نشان می‌دهد منحنی تغییر مکان به دست آمده از مدل عددی مطالعه حاضر با نتایج حاصل از روش عددی وینکلر و مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش تطابق خوبی دارد.



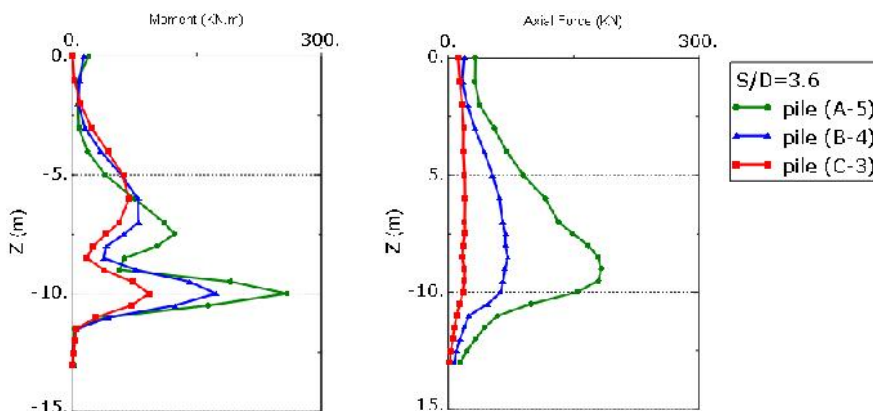
شکل ۳: مقایسه نتایج آنالیز استاتیکی مدل با نتایج آزمایشگاهی و روش عددی وینکلر

## نتایج تحلیل

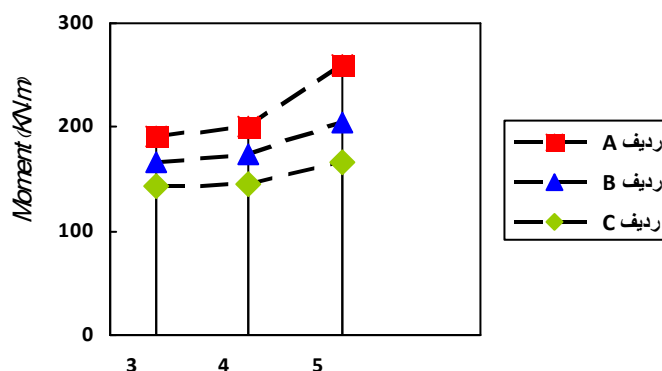
در این بخش نتایج تحلیل به صورت منحنی‌های پوش لنگر خمشی و نیروی محوری در امتداد شمع‌ها در گروه  $5 \times 5$  واقع در دو لایه‌ی خاک با رفتار غیرخطی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل ۱، شمع‌ها با توجه به محور تقارن به ردیف‌های A، B و C و ستون‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ تقسیم‌بندی شده‌اند. همچنین به دلیل تشابه عملکرد شمع‌ها با هم، از شمع‌ها در ستون‌ها ۱ و ۲ صرف نظر کرده و فقط نتایج ۹ شمع در ردیف‌های A، B و C و ستون‌های ۳، ۴ و ۵ مورد توجه می‌باشند.

شکل ۴، منحنی‌های پوش لنگر خمشی و نیروی محوری را در راستای قطر مربعی شکل گروه شمع  $5 \times 5$  و با شماره‌های 3-C، 4-B و 5-D نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثرات لایه‌ای خاک با تفاوت سختی زیاد در محیط پیرامون گروه شمع‌ها، باعث ماکزیمم شدن نیروهای محوری و لنگرهای خمشی در نقاط نزدیک به مرز جدایی لایه‌ها شده است. لازم به ذکر است که رفتار غیرخطی خاک سبب می‌شود تا ماکزیمم لنگر خمشی در ارتفاع میانی شمع‌ها واقع در لایه اول خاک بوجود آید. این نتایج تشابه خیلی خوبی با نتایج حاصل از دیگر روش‌ها در تحقیقات گذشته دارد. از مقایسه منحنی‌های پوش لنگر خمشی مشاهده می‌شود که هر چه محل قرارگیری شمع‌ها به مرکز گروه نزدیکتر باشد، لنگرهای خمشی کمتری در امتداد شمع‌ها بوجود می‌آید. این مساله به دلیل افزایش اثرات همپوشانی شمع‌ها با یکدیگر می‌باشد. به طوری که از شدت فشارها و تغییر شکل‌های جانبی وارده از طرف خاک به شمع کاسته شده است. همچنین بیشترین تغییرات این نیروها در نقاط مرز مشترک لایه‌ها اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر از مقایسه منحنی‌های پوش نیروهای محوری در شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که هر چه شمع‌ها در فاصله دورتری از مرکز گروه قرار داشته باشند، مقدار نیروی محوری در امتداد شمع‌ها بیشتر می‌باشد. این مساله به این دلیل است که شمع‌های کناری نسبت به شمع‌های داخل گروه با جابه‌جایی‌های قایم بزرگتری روبرو می‌شوند. به همین دلیل مقدار نیروهای محوری در امتداد شمع 5-D دلیل قرارگیری در کناره‌های گروه نسبت شمع‌های 3-C و 4-B بیشتر می‌باشد. در شکل ۵ نمودار تغییرات ماکزیمم لنگر خمشی شمع‌های گروه  $5 \times 5$  در مرز مشترک دو لایه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار لنگر شمع‌ها از ستون ۳ تا ۵ و نیز ردیف C تا A افزایش می‌یابد. درصد افزایش ماکزیمم لنگر خمشی شمع‌ها در ستون شماره ۳ نسبت به ۴ و ستون ۴ نسبت به ۵ به ترتیب در ردیف A برابر ۸ و ۲۴ درصد و در ردیف B برابر ۴ و ۲۱ درصد و در ردیف C برابر ۳ و ۱۵ درصد می‌باشند. همچنین این تغییرات در راستای قرارگیری شمع‌ها در ردیف C نسبت به B و در ردیف B نسبت به A به ترتیب در ستون شماره ۳ برابر ۱۶ و ۱۷ درصد و در ستون شماره ۴ با برابر ۱۸ و ۲۱ درصد و در ستون شماره ۵ در هر دو حالت برابر ۲۴ درصد افزایش می‌یابند. شکل ۶ نمودار تغییرات ماکزیمم نیروی محوری در امتداد شمع‌ها در گروه  $5 \times 5$  را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، هرچه به کناره‌های گروه نزدیک می‌شویم مقادیر نیروی محوری افزایش می‌یابد. به طوری که شدت افزایش این نیرو در جهت ردیف‌ها نسبت به جهت ستون‌ها به طور قابل توجهی بیشتر می‌باشد. درصد افزایش ماکزیمم نیروی محوری در امتداد شمع‌ها در راستای ستون شماره ۳ نسبت به ۴ و ستون شماره ۴ نسبت به ۵ به ترتیب در ردیف A حدود ۲.۱۷ و ۲.۷ برابر و در ردیف B حدود ۲.۳۵ و ۲.۷ برابر و در ردیف C حدود ۲ و ۲.۹ برابر و در امتداد شمع‌ها در راستای ردیف C نسبت به B و ردیف B نسبت به A به ترتیب در ستون شماره ۳ برابر ۱۵ و ۳۳ درصد و در ستون شماره ۴ برابر ۳۶ و ۲۲ درصد و در ستون شماره ۵ برابر ۲۷ و ۲۵ درصد می‌باشند. از مقادیر تغییرات لنگرهای

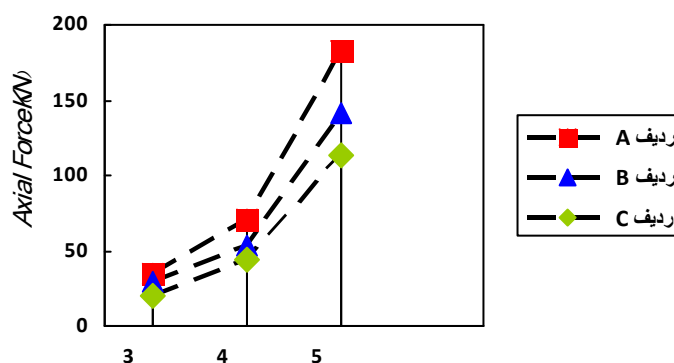
خمشی و نیروهای محوری در امتداد گروه شمع  $5 \times 5$  در هر دو شکل ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که شدت اثرات اندرکنش کینماتیکی لرزه‌ای شمع-خاک-شمع روی نیروهای محوری شمع‌ها نسبت به لنگرهای خمشی بیشتر است.



شکل ۴: مقایسه منحنی‌های پوش لنگر خمشی و نیروی محوری شمع‌ها در جهت قطر مربع گروه  $5 \times 5$



شکل ۵: مقایسه ماکزیمم لنگر خمشی در امتداد شمع‌های گروه  $5 \times 5$  در فصل مشترک دو لایه خاک



شکل ۶: مقایسه ماکزیمم نیروی محوری در امتداد شمع‌ها در گروه  $5 \times 5$

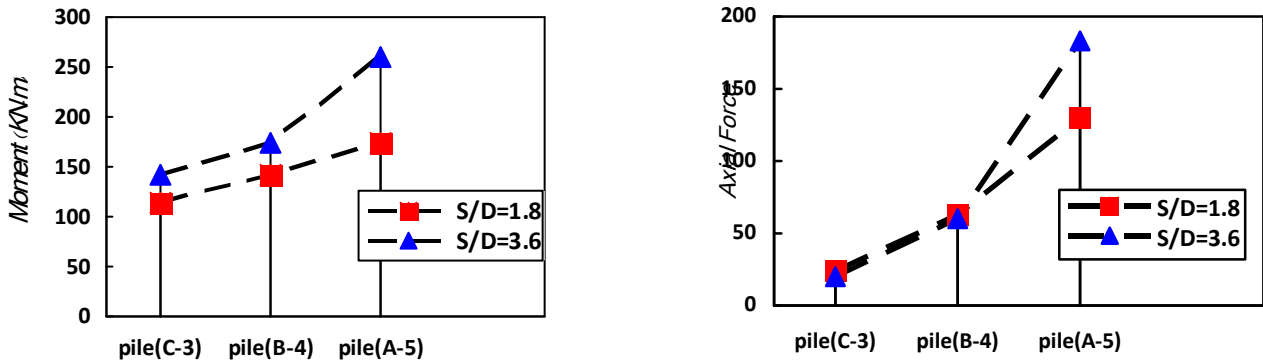
## مطالعات پارامتری

در گروه شمع، به علت قرارگیری شمع‌ها در مجاورت یکدیگر، فشارهای جانبی ناشی از خاک بر هر یک از شمع‌ها با یکدیگر همپوشانی دارند. در اثر پدیده اندرکنش کینماتیکی شمع - خاک - شمع در خلال حرکت زلزله، این همپوشانی نیروهای کینماتیکی شمع‌ها را می‌تواند کاهش دهد. پارامترهای متعددی روی رفتار لرزه‌ای گروه شمع تاثیرگذار هستند که از جمله آنها می‌توان به نسبت فاصله به قطر شمع‌ها و تعداد شمع‌ها در گروه اشاره کرد. در ادامه، با انجام مطالعات پارامتری، تاثیر تغییر این عوامل را روی نیروهای محوری و لنگرهای خمشی گروه شمع‌ها واقع در خاک لایه‌ای مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



## بررسی تغییرات نسبت فاصله به قطر شمع‌ها

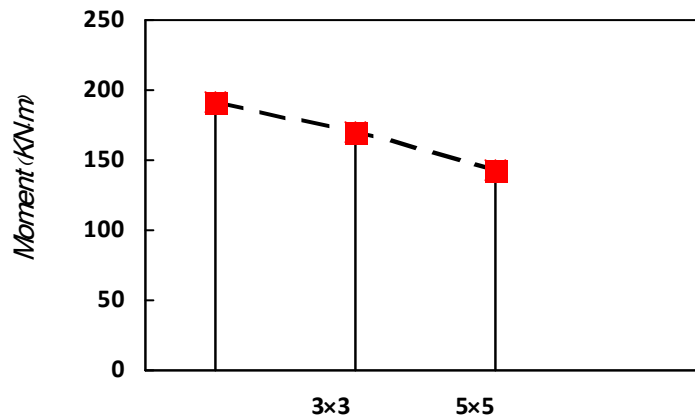
در این بخش، به منظور مطالعه و بررسی اثر نسبت فاصله به قطر شمع‌ها بر روی نیروهای کینماتیکی، تحلیل‌های لرزه‌ای روی گروه شمع واقع در خاک دو لایه‌ای مطابق مدل شکل ۱ انجام شده است. شکل ۷، نمودارهای تغییر لنگرهای خمشی حداکثر و نیز نیروی محوری حداکثر را در نزدیک مرز مشترک لایه‌ها برای شمع‌های (C-3)، (B-4) و (A-5) یه ازای دو نسبت ۱.۸ و ۳.۶ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش نسبت فاصله به قطر شمع، مقادیر هر دو نوع نیرو در تمام شمع‌ها کاهش می‌یابند. به صورتی که بیشترین و کمترین تغییرات به ترتیب در شمع‌های شماره‌ی (A-5) و (C-3) اتفاق می‌افتد. همچنین در این راستا، شدت تغییرات نیروهای محوری در بین شمع‌های فوق بیشتر از مقادیر لنگرهای خمشی دیده می‌شود. بر اساس شکل ۷ به طور کلی میتوان نتیجه گرفت که هر چه شمع‌های یک گروه در فاصله کمتری از یکدیگر قرار گیرند میزان تغییر نیروهای محوری و لنگرخمشی در بین آنها کمتر می‌باشد.



شکل ۷: نمودار تغییرات لنگرهای خمشی حداکثر در نقاط فصل مشترک دو لایه و نیز نیروهای محوری حداکثر در امتداد گروه شمع  $5 \times 5$  برای دو نسبت فاصله به قطر شمع برابر ۱.۸ و ۳.۶

## بررسی اثرات تعداد شمع‌ها

برای بررسی اثرات تعداد شمع بر روی نیروهای کینماتیکی، تحلیل‌های دینامیکی برای شمع منفرد و گروه‌های شمع  $3 \times 3$  و  $5 \times 5$  واقع در خاک دو لایه‌ای مطابق شکل ۱ انجام گرفته است. در این تحلیل‌ها، نسبت فاصله به قطر شمع برابر ۳.۶ فرض شده و از رکورد زلزله طبرس استفاده می‌شود. از مقایسه نتایج منحنی پوش لنگرخمشی شمع منفرد با شمع‌های مرکزی در گروه‌های  $5 \times 5$  و  $3 \times 3$  مشاهده شد که با افزایش تعداد شمع-ها در گروه، لنگرخمشی حداکثر در امتداد شمع کاهش می‌یابد. این مساله به دلیل افزایش اثرات همپوشانی فشارهای خاک ناشی از انتشار امواج زلزله در بین گروه با تعداد شمع بیشتر بوده و باعث می‌شود که نیروهای لرزه‌ای کمتری از طرف خاک به شمع وارد شود و در نتیجه لنگرهای خمشی کوچکتری در گروه شمع‌ها نسبت به شمع منفرد تولید می‌شود. با نگاه دقیق به این منحنی‌ها، بیشترین تغییرات لنگر خمشی در فصل مشترک دو لایه خاک اتفاق می‌افتد. شکل ۸، نمودار تغییرات لنگر خمشی را در شمع منفرد و شمع‌های مرکزی در گروه‌های  $5 \times 5$  و  $3 \times 3$  برای فصل مشترک دو لایه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، درصد کاهش لنگر در شمع‌های مرکزی گروه‌های  $3 \times 3$  و  $5 \times 5$  نسبت به شمع منفرد به ترتیب حدود ۱۲ و ۳۵ درصد می‌باشند.



شکل ۸: مقایسه لنگر خمشی حداکثر در فصل مشترک دو لایه در شمع منفرد و شمع مرکزی در گروه‌های  $5 \times 5$  و  $3 \times 3$



## نتیجه گیری

در این تحقیق، به کمک نرم افزار اجزای محدود آباکوس، تحلیل‌های سه بعدی دینامیکی برای بررسی نیروهای کینماتیکی لرزه‌ای در امتداد گروه شمع واقع در دو لایه‌ی خاک رس نرم و سخت با خصوصیات رفتاری الاستوپلاستیک انجام شد. از مدل درآگر - پراگر سخت‌شونده برای رفتار غیرخطی خاک و از المان‌های نامحدود برای جلوگیری از برگشت امواج لرزه‌ای به داخل مدل و اثر جعبه‌ای استفاده گردید. صحت نتایج مدل عددی برای شمع منفرد تحت بارگذاری‌های استاتیکی با نتایج آزمایشگاهی و روش عددی وینکلر مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که مدل به کار رفته قادر به پیش‌بینی پاسخ شمع‌ها می‌باشد. سپس با انجام مطالعات پارامتری اثرات عوامل موثر بر روی نیروهای کینماتیکی در مقاطع گروه شمع‌ها شامل نسبت فاصله به قطر شمع‌ها و تعداد شمع‌ها در گروه مورد بحث و بررسی قرار گرفت. بمنظور تحلیل، تاریخچه زمانی شتاب زلزله طبری (۱۹۷۸) به صورت گذرا به کف مدل اعمال شد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها به صورت منحنی‌های پوش نیروهای محوری و لنگر خمشی و نمودار تغییرات ماکزیمم مقدار این نیروها در امتداد شمع نشان می‌دهد که:

در نظر گرفتن تاثیر مشخصات خاک پیرامون شمع با شرایط واقع بینانه‌تر بویژه اثر مرز مشترک جدایی دو لایه دارای تباين و مغایرت بیش از حد خواص مکانیکی خاک، باعث ماکزیمم شدن نیروهای محوری و لنگرهای خمشی شمع در مقاطع نزدیک به این نقاط بحرانی می‌شود. هر چه محل قرارگیری شمع‌ها به مرکز گروه نزدیکتر باشد مقدار لنگر خمشی و نیروهای محوری کوچکتری در شمع بوجود می‌آید. این مساله به دلیل افزایش همپوشانی و کاهش شدت فشارهای لرزه‌ای وارده از طرف خاک به شمع و کاهش بازوی دوران شمع‌ها می‌باشند. بیشترین تغییرات این نیروها در نقاط نزدیک به فصل مشترک دو لایه اتفاق می‌افتد. با افزایش نسبت فاصله به قطر شمع‌ها مشاهده شد که مقدار نیروی محوری و لنگر خمشی در شمع افزایش می‌یابد. این مساله می‌تواند به کاهش انسجام سیستم گروه شمع در نتیجه افزایش فاصله بین شمع‌ها و در واقع کاهش راندمان مربوط به عملکرد گروهی آنها نسبت داده شود. نتیجه این تغییر آن است که سیستم به صورت غیر منسجم و با همپوشانی کمتر در برابر بارگذاری مقاومت نموده و در نتیجه لنگرهای خمشی و نیروهای محوری در امتداد شمع‌های گروه افزایش می‌یابند. در خاتمه، افزایش تعداد شمع‌ها در گروه باعث کاهش لنگرهای خمشی (اثری مفید) و افزایش نیروهای محوری (اثری زیان‌آور) در امتداد گروه شمع‌ها نسبت به شمع‌های منفرد می‌گردد.

## مراجع

شبخوان م، تحقیقی ح و استادحسین ح (۱۳۹۳) نیروهای کینماتیکی لرزه‌ای در شمع‌های منفرد واقع در محیط خاک لایه‌ای غیرخطی، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، ایران

ABAQUS (2009) General finite element analysis program version 6.9.3 manual

Bentley KJ and El Nagger MH (2000) Numerical analysis of kinematic response of single piles, Canadian Geotechnical Journal, 37: 1368-1382

Dezi F, Carbonari S and Leoni G (2009) A model for the 3D kinematic interaction analysis of pile groups in layered soils, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 38(11): 1281-305

Maiorano RMS, Aversa S and Wu G (2007) Effects of soil non-linear on bending moments in piles due to seismic kinematic interaction, 4th Inter. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Greece, paper No. 1574

Matlock H (1970) Correlations of design of laterally loaded piles in soft clay, In: Proceedings of the offshore technology conference, Vol. 1 (1204), Houston, Tx, P. 577-594

Nikolaou A, Mylonakis G, Gazetas G and Tazoh T (2001) Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements, Geotechnique, 51(5): 425-440

Rajib S and Maheshwari BK (2008) Three dimensional seismic analysis of pile groups, 12th International Conference of IACMAG

Wu G and Finn WDL (1997) Dynamic nonlinear analysis of pile foundations using finite element method in the time domain, Canadian Geotechnical Journal, 34(1): 44-52

