



مطالعه رفتار دینامیکی گروه شمع مایل تحت بارهای جانبی ناشی از زلزله با استفاده از روش اجزاء محدود

علیمحمد شیخ بهایی^۱، امیرمهدی حلبیان^۲

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران، تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۱

پست الکترونیک: ali3726@cv.iut.ac.ir

پست الکترونیک: mahdi@cc.iut.ac.ir

چکیده:

در این مقاله بر اساس روش اجزاء محدود، مدلی عددی به منظور مطالعه رفتار دینامیکی گروه شمع های مایل بسط داده می شود. معیار پلاستیسیته خاک در این مطالعه مدل دراگر پراگر سخت شونده بوده و برای اعمال شرایط مرزی به محیط از مجموعه ای المان های میراگر برای لحاظ کردن مرز جاذب انرژی استفاده شده است. مجموعه گروه شمع چهار تایی اصطکاکی تحت تأثیر بارگذاری دینامیکی به وسیله روش تحلیل دینامیکی صریح با اعمال میرایی رایلی تحلیل شده است. در این بررسی علاوه بر اثر زاویه تمایل شمع، اثر نسبت لاغری و نسبت فواصل شمع ها به روی قطر شمع، بر پاسخ گروه شمع مورد توجه قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: گروه شمعهای مایل، بارگذاری دینامیکی، تحلیل دینامیکی صریح.

مقدمه

شالوده های شمعی کاربردهای متعددی در بسیاری از مقاصد مهندسی ژئوتکنیک دارند. نیروهای وارد بر این سازه ها عمدتاً نیروهای محوری ناشی از وزن سازه های فوقانی و نیروهای ناشی از ترافیک خودروها، نیروهای ناشی از جرقه ها، بارهای ضربه ناشی از پهلوگیری کشتی ها و نیروهای ایجاد شده بوسیله امواج می باشند. مطالعات متعددی در زمینه تعیین ظرفیت باربری جانبی شالوده های شمعی تحت تأثیر نیروهای ناشی از زلزله صورت گرفته است. روش های تحلیلی متعددی توسط تعدادی از محققان نظیر Kaynia و Kausel (۱۹۸۲) [۱]، Sen و همکاران (۱۹۸۵) [۲]، Dobry و Gazetas (۱۹۹۲) [۳] و بسیاری دیگر بسط داده شد که در آنها پاسخ دینامیکی گروه شمع را با فرض رفتار خطی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. Nogami و Konagai (۱۹۸۶، ۱۹۸۸) [۴] و [۵]، پاسخ دینامیکی گروه شمع را با استفاده از تئوری وینکلر مورد توجه قرار دادند. Nogami و همکاران (۱۹۹۲) [۶]، با تعریف عناصر جدا از هم جرم، فنر و میراگر توانستند رفتار گروه شمع را با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک بررسی کنند. Novak و El Neggar (۱۹۹۵، ۱۹۹۶) [۷]، یک تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی برای گروه شمع تحت بارهای جانبی با استفاده از تئوری وینکلر به انجام رساندند. مطالعات فوق نشانگر این مطلب است که رفتار غیر خطی خاک در پاسخ گروه های شمع تأثیر قابل ملاحظه ای دارد. Trochanis و همکاران (۱۹۹۱) [۸]، به بررسی رفتار شمع با ارائه یک مدل سه بعدی از شمع قائم واقع در خاک رس و فرض یک رفتار الاستوپلاستیک برای خاک پرداخت. همچنین Shie و Brown (۱۹۹۱) [۹]، از روش تفاضل های محدود استفاده کرده و شمع را به صورت یک المان تیری شکل و خاک را به صورت فنرهای غیرخطی متصل به شمع مدل کردند که این فنرهای غیر خطی با استفاده از منحنی های p-y در فواصل مشخصی از طول شمع تعریف می گردند.

استفاده از شمع های مایل به دلیل مقاومت چشمگیر آنها در برابر بارهای جانبی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. به دلیل آنکه گروه های شمع قائم از سختی و مقاومت جانبی کمی برخوردار هستند و عملکرد ضعیفی در برابر نیروهای جانبی ناشی از زلزله از خود نشان می دهند، استفاده از گروه های شمع مایل گزینه ای مناسب برای مقاومت در برابر بارهای جانبی و نیروهای اینرسی بوجود آمده می باشد. استفاده از گروه های شمع در مناطق لرزه ای متأثر از محدودیت های خاصی نیز خواهد بود به گونه ای که حتی بعضی از طراحان استفاده از شمع های مایل در مناطق لرزه خیز را مخاطره آمیز توصیف می کنند؛ چراکه با استفاده از این شمع ها احتمال ایجاد نیروهای فوق العاده بزرگ در کلاهک افزایش یافته و همچنین در صورت وجود عدم

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مکانیک خاک و پی

۲. استادیار دانشکده مهندسی عمران-دانشگاه صنعتی اصفهان

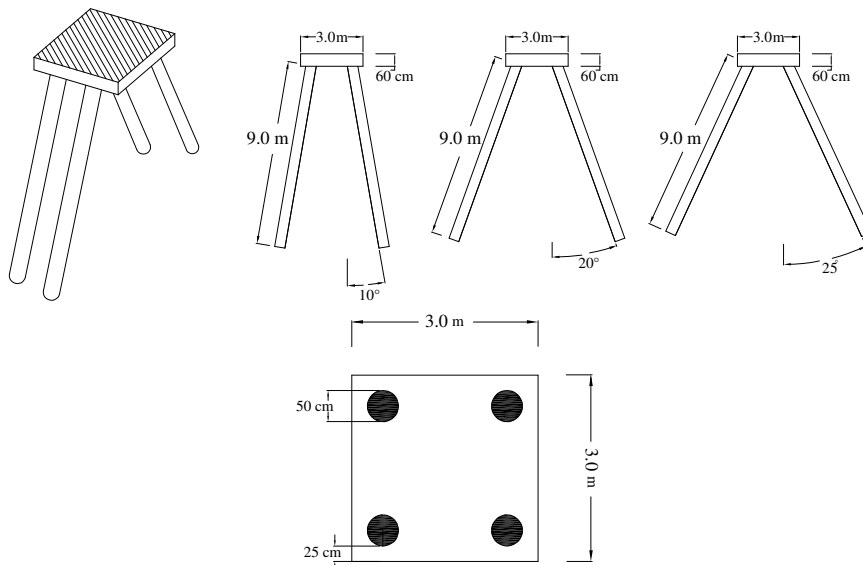


تقارن در زاویه تمایل گروه شمع احتمال به وجود آمدن پیچش در آن افزایش خواهد یافت [۱۰، ۱۱]. بر اساس گزارش های Mylonakis و Gazetas (۱۹۹۸) [۱۲]، شواهد نشان می دهد که کاربری شمع های مایل در موارد خاص هم برای گروه شمع و هم برای سازه های واقع بر آن مفید خواهد بود. برای مثال در زلزله کوبه ژاپن مشاهده گردید که یکی از دیوارهای اسکله ای سالم به جا مانده از زلزله بر روی یک گروه شمع مایل واقع بوده است در حالی که کلیه دیوارهای مجاور که بر روی گروه شمع های قائم قرار داشته اند، کاملاً ویران شده اند. همچنین Juran و همکاران (۲۰۰۱) [۱۳]، با انجام آزمون های سانتریفیوژ و تحلیل های شبه استاتیک به این نتیجه دست یافتند که با افزایش زاویه تمایل گروه شمع تا مقدار معینی، تغییر مکان ها و لنگرهای خمشی در محل اتصال کلاهک به شمع ها به طور مؤثری کاهش خواهد یافت.

در این مقاله سعی بر آن شده است که اثر زاویه تمایل گروه شمع در چگونگی پاسخ آنها تحت بارهای جانبی ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا ضمن بسط یک مدل اجزاء محدود، با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی سیکلی خاک، پاسخ دینامیکی یک گروه شمع تحت تأثیر تحریک زلزله طی یک سری مطالعات پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای تأثیرگذار در رفتار دینامیکی این گونه شمع ها ارائه می گردد.

تشریح مسئله

در این مقاله رفتار دینامیکی گروه شمع های مایل تحت اثر بارهای جانبی ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار یک گروه شمع اصطکاکی در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. گروه های شمع هریک شامل چهار شمع بتنی با مقطع دایروی به قطر ۵۰ سانتیمتر و طول ۹ متر بوده و به طور کامل در درون خاک مدفون هستند. خواص مصالح خاک و بتن مورد استفاده برای شمع ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای اتصال شمع ها از یک کلاهک به ابعاد ۳×۳ متر و ضخامت ۶۰ سانتیمتر استفاده می گردد. به منظور مطالعه اثر زاویه تمایل گروه شمع چهار دسته شمع با زوایای تمایل ۰، ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد محیط خاکی اطراف گروه شمع نیز ۲۵×۲۵×۲۰ متر می باشد. در عین حال برای بررسی اثرات فاصله گذاری شمع ها سه گروه شمع با زاویه تمایل ۲۰ درجه و با فاصله گذاری های ۵ و ۴.۳ s/d مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی اثر لاغری نیز دو نوع نسبت لاغری برای این گروه شمع مورد توجه قرار می گیرد. لازم به ذکر است که زاویه تمایل گروه شمع ها در جهت محور X ها می باشد. مشخصات هندسی مقاطع شمع و کلاهک در شکل ۱ ملاحظه می شود.



شکل ۱- مشخصات هندسی مقاطع شمع و کلاهک

برای انجام تحلیل های دینامیکی تحریکات لرزه ای در کف توده خاکی اعمال می گردد. نوع این تحریکات به صورت گذرا بوده و راستای آن نیز در جهت محور X ها می باشد. برای اعمال این تحریک از طیف شتاب نگاشت زلزله ناغان با حداکثر دامنه شتاب ۰/۷۲g استفاده شده است [۱۴]. همچنین برای در نظر گرفتن اثر ناشی از سازه فوقانی یک بارگسترده فشاری بر سطح کلاهک اعمال می شود.

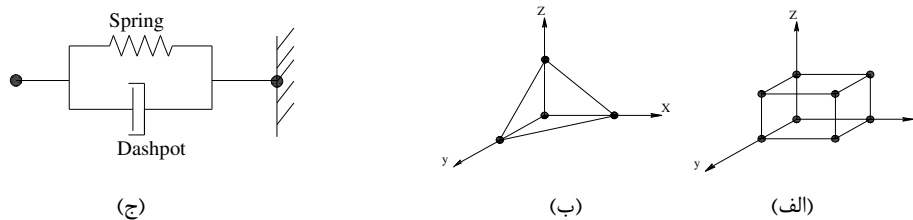


جدول ۱- مشخصات خاک و بتن مورد استفاده برای شمع ها

مشخصات خاک							
ρ (kg/m ³)	ν	C (kPa)	ϕ	G (kPa)	E (kPa)	V_s (m/s)	ξ
۱۸۰۰	۰/۲	۰/۱۰	۳۰°	۱/۸۸۱۰ ^۷	۴/۳۲۸۱۰ ^۸	۱۰۰	٪۱
مشخصات بتن مورد استفاده برای شمع ها							
ρ (kg/m ³)	ν	E (kPa)		ξ			
۲۴۵۰	۰/۲۵	۲/۱۸۱۰ ^۹		٪۲/۵			

مدلسازی مسئله

پی های ارائه شده برای مجموعه گروه شمع، در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS 6.5 مدلسازی شده اند. برای انجام تحلیل اجزاء محدود هر یک از اجزاء سیستم باید به نحو مناسبی مش بندی شوند به همین لحاظ جهت مش بندی گروه شمع از المان های چهار گره ای (چهاروجهی) استفاده شده است. لیکن جهت حصول دقت در نتایج برای مش بندی محیط خاکی اطراف از دو نوع مش بندی استفاده می گردد. بدین ترتیب که برای نواحی نزدیک گروه شمع از همان المان های چهارگه ای و برای نواحی دورتر از المان های هشت گره ای (هشت وجهی) استفاده شده است (شکل ۲). هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی در راستای X، Y و Z می باشد. برای کلیه مدل های مورد بررسی اندازه المان ها در نزدیکی گروه شمع بسیار کوچک بوده و به تدریج با فاصله گرفتن از گروه شمع اندازه المان ها افزایش می یابد. در حقیقت مش بندی محیط خاکی برای نواحی اطراف گروه شمع به دلیل تغییرات شدید تنش ها و اثرات پلاستیسیته خاک دقیق تر خواهد بود. برای مدلسازی محیط خاکی نیمه بی نهایت، از المان های میراگر به منظور اختصاص دادن مرز جاذب انرژی استفاده می گردد (شکل ۲). این المان ها در سه امتداد X، Y و Z در نقاط مشخص از مرز مش بندی به محیط خاکی متصل شده اند. استفاده از این المان ها به منظور مدلسازی شرایط نیمه بی نهایت خاک و انتشار امواج در داخل توده خاک است. معیار انتخاب ابعاد المان ها بر اساس رابطه $\Delta h \leq \lambda/10$ است که λ همان طول موج زلزله می باشد.



شکل ۲- الف) المان حجمی هشت گره ای مورد استفاده برای محیط خاک (ب) المان حجمی چهار نودی مورد استفاده برای گروه شمع و محیط خاکی (ج) المان میراگر دو نودی کلویین (فتر و میراگر)

مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای خاک یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک است که از تئوری ارتجاعی همسان برای رفتار الاستیک و از مدل پلاستیسیته دراکر-پراگر سخت شونده^۱، برای رفتار پلاستیک آن استفاده گردیده است. دو نوع خصوصیت اندرکنش در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است، یکی اندرکنش مماسی است که به جداره های شمع های اصطکاکی و زیر کلاهک اختصاص داده می شود و دیگری اندرکنش عمودی یا محوری است که به کف و جداره های شمع ها اختصاص می یابد و در آن رفتار اندرکنشی از نوع تماس سخت می باشد.

معادلات حاکم بر مسئله و حل

معادلات حاکم بر حرکت در لحظه $t + \Delta t$ بعد از اعمال زلزله مطابق زیر است؛

$$[M]\ddot{U}^{t+\Delta t} + [C]\dot{U}^{t+\Delta t} + [K]U^{t+\Delta t} = [R]^{t+\Delta t} \quad (1)$$

در عبارت فوق ماتریس M ، ماتریس قطری جرم خواهد بود زیرا تمام جرم ها در نقاط نودی متمرکز در نظر گرفته می شوند؛ C ماتریس میرایی سراسری که هم میرایی مادی و هم میرایی تشعشعی را در بر می گیرد؛ K ماتریس متقارن سختی است و شامل سختی فنرها در نقاط مرزی می باشد؛ $R^{t+\Delta t}$ بار خارجی در لحظه $t + \Delta t$ و \ddot{U}, \dot{U}, U به ترتیب هریک تغییر مکان، سرعت، شتاب نسبی نودی در لحظه $t + \Delta t$ می باشند.

1. Hardening Drucker-Prager Behaviour



برای این که میرایی مورد نظر به سیستم اعمال گردد، هر دو میرایی هندسی و مادی باید مورد توجه قرار گیرد. در واقع میرایی سیستم متشکل از دو نوع میرایی خواهد بود. یعنی؛

$$C = C_r + C_m \quad (2)$$

C_r ماتریس میرایی هندسی است و C_m ماتریس میرایی مادی می باشد. برای اعمال میرایی مادی به جای در نظر گرفتن رفتار هیستریسیس خاک تحت بارهای دوره ای از روش میرایی رایلی استفاده می گردد. اگر ماتریس میرایی $[C]$ به صورتی ترکیبی از ماتریس جرم و سختی باشد؛

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3)$$

در رابطه بالا α و β بیان کننده میرایی متناسب با سختی و جرم می باشد. نسبت میرایی ξ_j به فرکانس طبیعی ω_j (فرکانس ویژه مود i ام) بستگی دارد، مطابق با رابطه زیر؛

$$\xi_j = \frac{\alpha}{2\omega_j} + \frac{\beta\omega_j}{2} \quad (4)$$

با داشتن سرعت موج برشی و دو فرکانس طبیعی خاک (فرکانس های اساسی انتقالی افقی) با حل یک دستگاه دو معادله، می توان دو مجهول (ضرایب α و β) را بدست آورد؛

$$(\omega_j, \dot{\mathbf{i}}_j) \quad \alpha = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \quad \beta = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (5)$$

برای فرکانس های بالا (سختی زیاد) ضریب β نقش میراکنندگی را ایفا خواهد کرد در حالیکه برای فرکانس های پایین ضریب α نقش میراکنندگی را خواهد داشت. به همین منظور برای مصالح با فرکانس طبیعی پایین می توان فقط از ضریب میرایی متناسب با جرم یعنی α استفاده کرد. در این جا هم برای اعمال میرایی رایلی از ضریب α برابر 0.12 و ضریب β برابر صفر استفاده می گردد.

شرایط مرزی در کف و دیواره به صورت غلظتی بوده و به جهت اینکه امواج انتشار یافته به دیواره ها، به محیط بازتاب نشوند، مرزهای مصنوعی با استفاده از شرایط مرزی Viscous تعبیه گردیده است. برای محاسبه مقادیر ضریب میرایی از روابط زیر استفاده شده است [۱۵].

$$\sigma = \rho v_p \dot{w} \Rightarrow C_p = \rho A v_p \quad (6)$$

$$\tau = \rho v_s \dot{u} \Rightarrow C_s = \rho A v_s \quad (7)$$

این نوع شرایط مرزی قادر به جذب امواج هارمونیک و غیر هارمونیک هستند و به شرایط مرزی استاندارد موسومند.

روش حل مسئله و معادلات آن

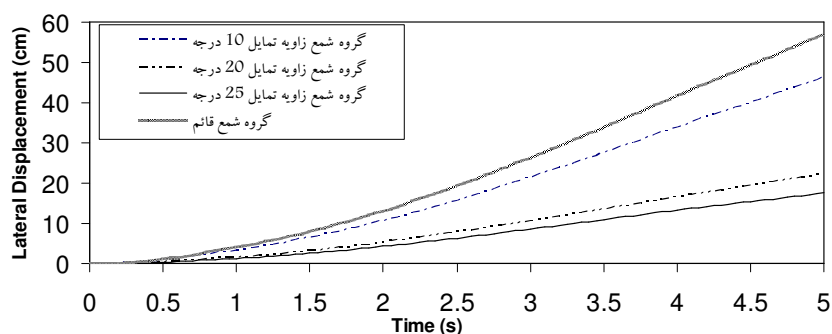
الگوریتم حل مورد استفاده در این مطالعه، روش حل صریح (Explicit) می باشد که کاربرد گسترده ای برای حل مسائل غیرخطی گذرا نظیر زلزله دارد. روش حل دینامیکی عددی صریح، بر اساس تحلیل دینامیکی می باشد که در آن سرعت و جابجایی به فرم عددی توسط انتگرال گیری از شتاب در هر مرحله بدست می آید. این روش مشابه حل عددی Wilson θ و شتاب ثابت و خطی حل عددی نیو مارک می باشد. روش حل صریح برای گام های زمانی کوچک مناسب است و بر اساس یک انتگرال گیری مستقیم بوده که با داشتن شتاب و ماتریس جرم سازه، معادله حرکت سازه را در هر مرحله زمانی حل می نماید. بر اساس روش شتاب ثابت که در الگوریتم حل تحلیلی صریح استفاده می شود.

نتایج تحلیل های پارامتریک

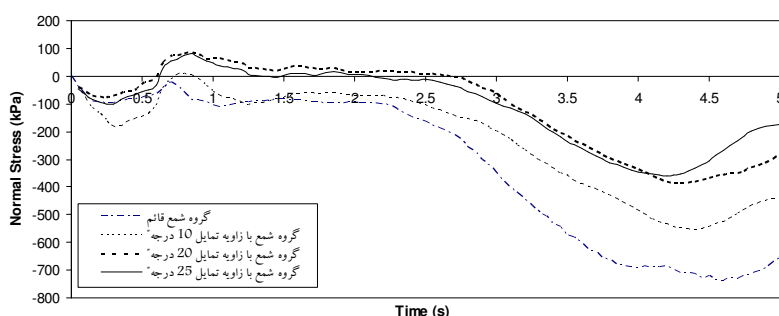
عوامل متعددی بر رفتار لرزه ای گروه شمع های مایل تأثیرگذار هستند که از آن جمله می توان به زاویه تمایل گروه شمع، فاصله گذاری نسبی شمع ها، نسبت لاغری شمع ها، سختی نسبی مصالح شمع (بتن) به خاک، میرایی، صلبیت و اندرکنش کلاهدک با خاک اشاره کرد. در این بررسی سعی بر آن می شود که چگونگی تأثیر سه عامل اول مورد مطالعه قرار گیرد.

-تأثیر زاویه تمایل شمع

پاسخ جابجایی افقی سیستم نسبت به زمان برای زوایای تمایل مختلف گروه شمع در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق با این نمودار ملاحظه می شود که با افزایش زاویه تمایل گروه شمع تغییر مکان های سر شمع کاهش یافته است. تأثیر زاویه تمایل شمع بر تنش های محوری بوجود آمده در سر شمع ها نیز برای چهار گروه شمع مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. (گروه شمع قائم و گروه های شمع با زوایای تمایل ۱۰، ۲۰، ۲۵ درجه). همانگونه که مشاهده می شود با افزایش زاویه تمایل گروه شمع مقدار تنش های محوری در سر شمع کاهش می یابد.

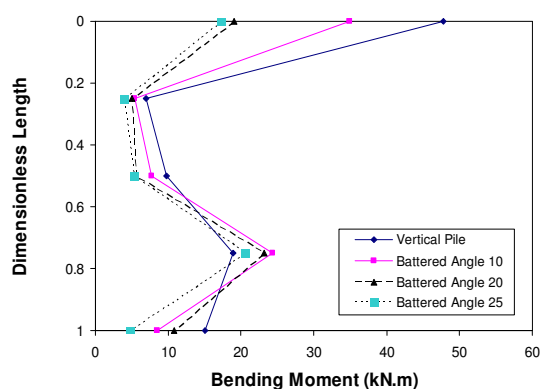
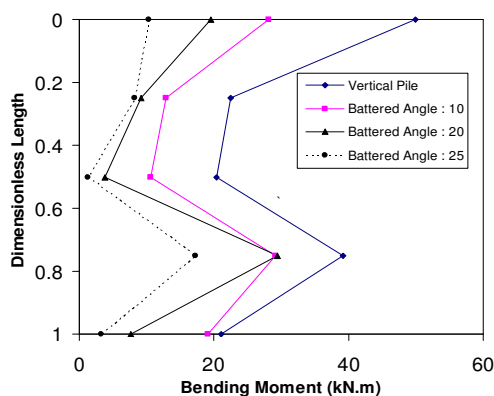


شکل ۳- نمودار تاریخچه زمان تغییر مکان های افقی در سر شمع

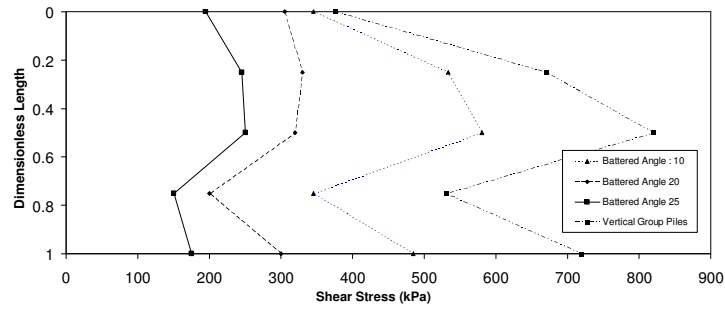


شکل ۴- نمودار تاریخچه زمان تنش های محوری در سر شمع

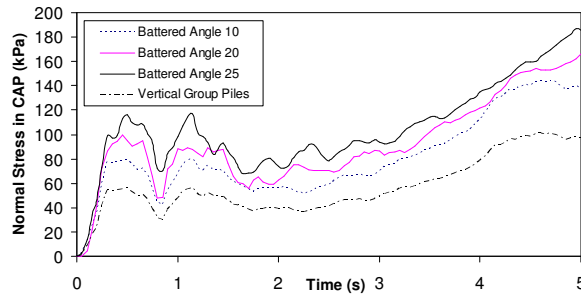
به دلیل آنکه با افزایش زاویه تمایل شمع سختی جانبی گروه شمع افزایش می یابد در نتیجه بخشی از ظرفیت باربری گروه شمع در تحمل نیروهای جانبی مشارکت می کند که این خود منجر به کاهش تنش های برشی در طول شمع گشته و از تغییر مکان های جانبی گروه شمع می کاهد. نمودار های شکل ۵ لنگر خمشی حداکثر را در طول استاندارد شمع های سمت چپ و راست و برای گروه های شمع قائم و مایل نمایش می دهد. نمودار تنش برشی برای گروه شمع های مایل نیز در شکل ۶ مشاهده می شود. نمودار شکل ۷ نمودار تاریخچه زمان تنش های محوری در کلاهک را نشان می دهد که مطابق با آن ملاحظه می شود که با افزایش زاویه تمایل مقدار تنش های محوری به وجود آمده در کلاهک افزایش خواهد یافت. در واقع با افزایش زاویه تمایل گروه شمع ها کمک به بهتر بسیج شدن سختی محوری در طول شمع می کند و در نتیجه آن می توان انتظار داشت که تنش های برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در اثر تحریکات لرزه ای کاهش یابند.



شکل ۵- نمودار لنگر خمشی حداکثر برای گروه های شمع های قائم و مایل (شمع های سمت راست و چپ)



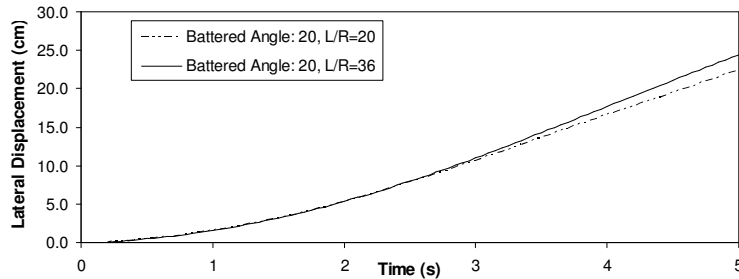
شکل ۶- نمودار تنش های برشی در طول استاندارد شمع برای ۴ گروه شمع مورد بررسی



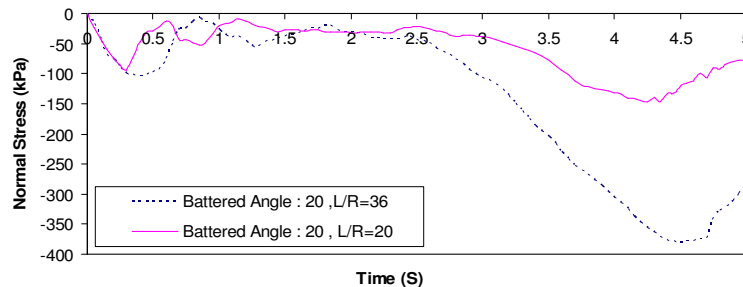
شکل ۷- نمودار تاریخچه زمان تنش های محوری در کلاهک برای گروه های شمع

– اثر نسبت لاغری شمعها

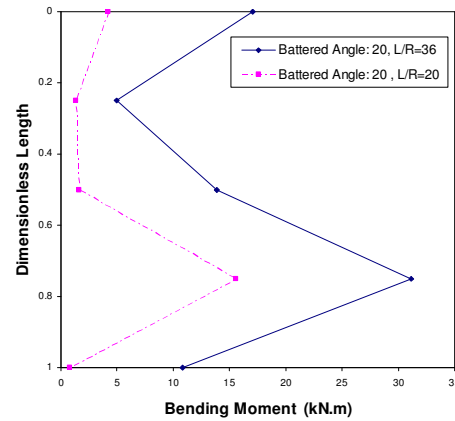
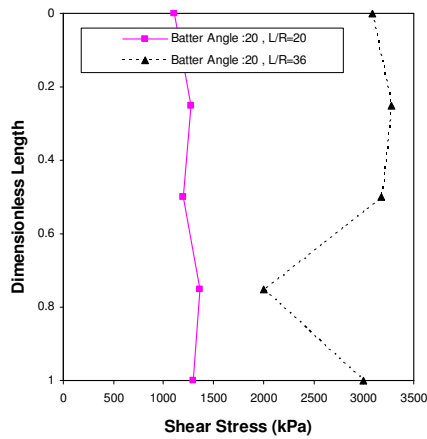
برای بررسی این اثر نسبت لاغری شمع ها از ۳۶ به ۲۰ کاهش داده شده است که این کار را با کاهش طول شمع از ۹ متر به ۵ متر انجام می گیرد. با این فرض که دیگر پارامترهای مؤثر بدون تغییر نگاه داشته شوند. نمودار تاریخچه زمان جابجایی هایی افقی سر شمع در شکل ۸ ارائه شده است و همانطور که ملاحظه می شود در این نمودارها جابجایی ها نسبت به حالتی که نسبت لاغری برابر ۳۶ باشد، اندکی کاهش می یابند. مطابق با شکل ۹ ملاحظه می شود که با کاهش نسبت لاغری مقدار تنش محوری در سر شمع به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. کاهش کم جابجاییها به این دلیل است که افزایش لاغری از مقدار حدوداً ۲۵ به بعد تاثیر قابل ملاحظه ای روی توابع سختی و میرایی نمی گذارد. شکل ۱۰ لنگر خمشی حداکثر و تنش برشی در طول استاندارد شمع برای دو گروه شمع با زاویه تمایل ۲۰ درجه و نسبت های لاغری $L/R = 20,36$ ارائه می کند.



شکل ۸- نمودار تاریخچه زمان تغییر مکان های جانبی شمع برای گروه های شمع های مایل با زاویه تمایل ۲۰ درجه و نسبت لاغری $L/R=20,36$



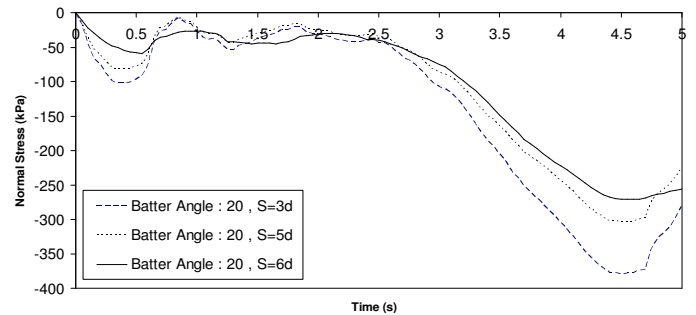
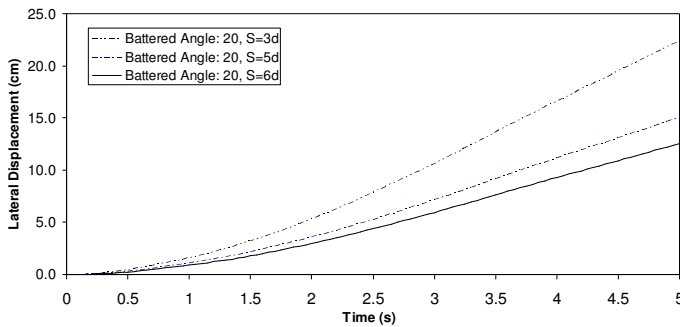
شکل ۹- نمودار تاریخچه زمان تنش های محوری در سر شمع برای گروه های شمع های مایل با زاویه تمایل ۲۰ درجه و نسبت لاغری $L/R=20,36$



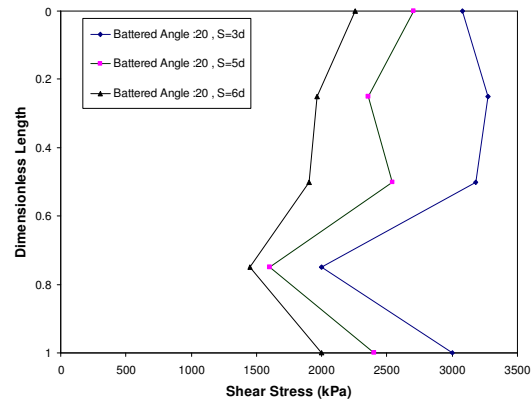
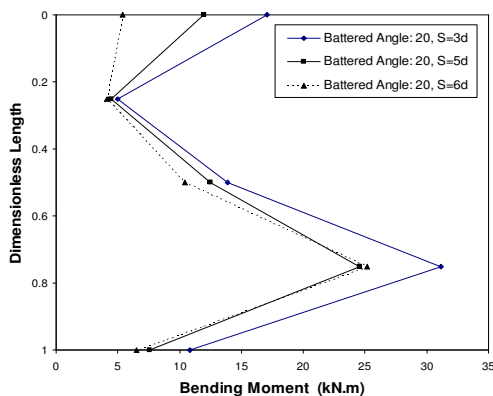
شکل ۱۰- نمودار لنگر خمشی حداکثر و تنش برشی در طول استاندارد شمع برای دو گروه شمع با زاویه تمایل ۲۰ درجه و نسبت لاغری $L/R=20,36$

اثر فاصله گذاری بین شمع ها

برای بررسی این اثر سه نوع گروه شمع با زاویه تمایل یکسان برابر ۲۰ درجه و نسبت های فاصله گذاری متفاوت $S/D=3,4,5$ مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل ۱۱ نمودار تاریخچه زمان تغییر مکان های محوری و تنش های محوری برای این سه گروه شمع نمایش داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش نسبت فاصله گذاری بین شمع مقدار تنش های محوری کاهش می یابند. به دلیل آن که اثر اندرکنش متقابل شمع ها بر روی یکدیگر با افزایش فاصله بین شمع ها کاهش می یابد، مشاهده می شود که شدت تنش ها در محل اتصال کلاهک و شمع کاهش یافته است. در شکل ۱۲ نمودارهای حداکثر لنگر خمشی و تنش برشی در طول استاندارد شمع ارائه شده است، با افزایش فاصله بین شمع ها از میزان لنگر در طول شمع کاسته می شود.



شکل ۱۱- نمودار تاریخچه زمان تغییر مکان های جانبی و تنش محوری در سرشمع برای دو گروه شمع با زاویه تمایل ۲۰ درجه و فاصله گذاریهای $S/D=3,4,5,6$



شکل ۱۵- نمودارهای حداکثر لنگر خمشی و تنش برشی در طول استاندارد شمع برای دو گروه شمع با زاویه تمایل ۲۰ درجه و فاصله گذاریهای $S/D=3,4,5,6$



نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله رفتار دینامیکی گروه شمع های مایل از نوع اصطکاکی تحت اثر بارهای جانبی ناشی از زلزله بررسی گردید. سه گروه شمع مایل با زاویه تمایل ۲۵ و ۳۰ و ۴۰ درجه با استفاده از روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم افزار (ABAQUS V.6.5.1) مورد مطالعه قرار گرفتند. اعمال شرایط مرزی به محیط با استفاده از مجموعه المان های میراگر برای لحاظ کردن مرز جاذب انرژی صورت می گیرد. برای حل مسئله از روش تحلیل دینامیکی صریح با اعمال میرایی رایلی استفاده می شود. در مطالعات پارامتریک اثر سه عامل زاویه تمایل گروه شمع، نسبت فاصله گذاری و نسبت لاغری شمع ها مورد توجه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از تحلیل ها نشان می دهد که؛

- ۱) با افزایش زاویه تمایل گروه شمع جابجایی های افقی گروه شمع ها کاهش می یابد. دلیل این مطلب آنست که با افزایش زاویه تمایل گروه شمع سختی جانبی مجموعه گروه شمع افزایش یافته و از مقدار تنشهای برشی در شمع ها می کاهد؛ در نتیجه می توان انتظار داشت که تغییر مکان های گروه شمع نیز کاهش یابد. همچنین با افزایش زاویه تمایل در گروه شمع مقدار تنش های محوری در محل اتصال شمع به کلاهک کاهش می یابد.
- ۲) به دلیل آن که اثر اندرکنش متقابل شمع ها بر روی یکدیگر با افزایش فاصله بین شمع ها کاهش می یابد، مشاهده می شود که جابجایی های افقی و شدت تنش ها در محل اتصال کلاهک و شمع کاهش می یابد. با افزایش فاصله بین شمع ها از میزان لنگرها کاسته می شود و همچنین مقدار تنش های برشی در طول شمع با افزایش فاصله بین شمع ها رو به کاهش می گذارد
- ۳) با کاهش نسبت لاغری مقدار تنش های محوری و همچنین لنگرهای خمشی در محل اتصال شمع و کلاهک رو به کاهش می گذارد. رفتار مشابه در مورد نمودار لنگر خمشی حداکثر گروه شمع با نسبت لاغری کمتر ملاحظه گردید و در نهایت ملاحظه شد که با کاهش نسبت لاغری شمع مقدار تنش های برشی در طول شمع کاهش می یابد
- ۴) زاویه تمایل گروه شمع اثر قابل ملاحظه ای بر مقدار تنش های محوری ایجاد شده در کلاهک دارد به گونه ای که با افزایش زاویه تمایل گروه شمع مقدار تنش های محوری ایجاد شده در کلاهک افزایش خواهد یافت.

مراجع

1. Kaynia, A.M., and Kausel, E. 1982. Dynamic behavior of pile groups. In Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Austin, Tex., 29–30 April 1982. University of Texas, Austin, Tex. pp. 509–532
2. Sen, R., Davis, T.G., and Banerjee, P.K. 1985. Dynamic analysis of piles and pile groups embedded in homogenous soils. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13(1): 53–65.
3. Dobry, R., and Gazetas, G. 1988. Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups. *Géotechnique*, 38: 557–574.
4. Nogami, T., and Konagai, K. 1986. Time domain axial response of dynamically loaded single piles. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 112(11): 1241–1252.
5. Nogami, T., and Konagai, K. 1988. Time domain flexural response of dynamically loaded single piles. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 114(9): 1512–1525.
6. Nogami, T., Otani, J., Konagai, K., and Chen, H.L. 1992. Nonlinear soil–pile interaction model for dynamic lateral motion. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 118(1): 89–106.
7. El Naggar, M.H., and Novak, M. 1996. Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15: 233–244.
8. Trochanis, A.M., Bielak, J., and Christiano, P. 1988. A threedimensional nonlinear study of piles leading to the development of a simplified model. Technical report of research sponsored by the National Science Foundation Grant ECE-86/1060, Carnegie Mellon University, Washington, D.C.
9. Brown, D.A., and Shie, C. F. (1991). "Modification of p-y curves to account for group effects on laterally loaded piles." *Geotechnical Engineering Congress Volume 1*, pp. 479-490.
10. Marwan Sadek, Isam Shahrour , (2006), Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26 (2006) 461–468.
11. Marwan Sadek, Isam Shahrour ,(2004) , Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24 (2004) 473–485.
12. Gazetas G. Mylonakis George seismic soil–structure interaction: new evidence and emerging issues. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Geo-Institute ASCE Conference, Seattle; 3–6 August, 1998.
13. Juran I, Benslimane A, Hanna S. Engineering analysis of dynamic behavior of micropile systems. *Transportation Research Record No. 1772*. *Soil Mech* 2001;91–106.
14. Pacific Earthquake Engineering Research Centre Website. (<http://peer.berkeley.edu>)
15. Wolf, J.P. 1985. *Dynamic soil–structure interaction*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.