

ارزیابی عددی موقعیت شمع‌های شناور در شیروانی تحت شرایط لرزه‌ای

علیرضا سعیدی عزیزکندی^{۱*}

محمدحسن بازیار^۲

امیرحسین کلاهدوزان^۳

حامد دشتارا^۳

چکیده

از عوامل اثرگذار بر عملکرد بهینه شمع‌های شناور در بهبود پایداری شیروانی‌ها موقعیت قرارگیری آن‌ها است. تاکنون مطالعات بسیاری برای بررسی این موضوع با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل صورت گرفته است. به دلیل اهمیت این موضوع تحت شرایط لرزه‌ای، نیاز به مطالعات بیشتری در این حوزه بوده و لذا در این پژوهش، موقعیت قرارگیری شمع‌های شناور با استفاده از روش اجزای محدود، تحت شرایط لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی این موضوع از سه پارامتر آرچینگ، تغییر مکان تاج شیروانی و نیز ممان خمشی استفاده شده است. با استفاده از تعریف ضریب انتقال بار می‌توان آرچینگ را به صورت کمی درآورده و در تحلیل از این پدیده بهره برد. برای بررسی موقعیت بهینه شمع یک مطالعه عددی جامع وابسته، به صورت سه‌بعدی انجام شده است. در مدل سازی صورت گرفته با استفاده از کد نویسی تغییر مدول الاستیسیته در عمق با توجه به سربار نیز در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور اطمینان از صحت روند مدل سازی، نتایج بدست آمده با یک پژوهش آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری شمع در نیمه اول بخش فوقانی شیروانی $(\frac{X_P}{L_H} = 0.5 - 0.75)$ بهینه‌ترین موقعیت از لحاظ کسب بیشترین پایداری می‌باشد.

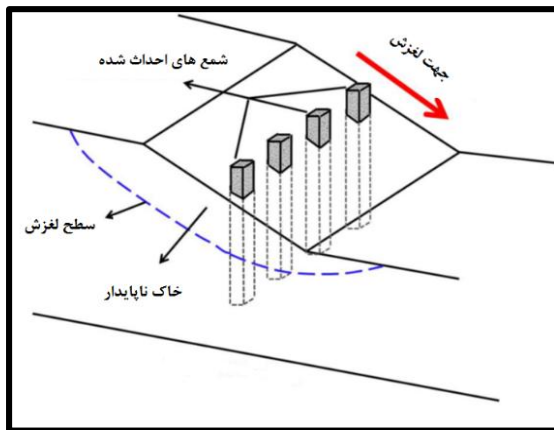
واژه‌های کلیدی

شیروانی، شمع شناور، موقعیت شمع شناور، تحریک لرزه‌ای، مدل سازی عددی

^۱. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. asaeeidia@iust.ac.ir. ۷۷۲۴۰۳۹۸

^۲. استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

^۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.



شکل (۱): تصویر شماتیک از پایدارسازی شیروانی با شمع (الدفاعی، ۲۰۱۳)

شمع از لحاظ سازه‌ای تحت ممان خمشی ایجادشده گسیخته نشود (الدفاعی^۹، ۲۰۱۳).

یکی از مهم‌ترین مسائل در این روش موقعیت قرارگیری شمع می‌باشد. با مراجعه به پژوهش‌های پیشین و بررسی مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که تحلیل این موضوع با در نظر گرفتن پدیده آرچینگ تحت شرایط لرزه‌ای موضوعی است که کمتر به آن پرداخته شده است. منظور از آرچینگ در اینجا انتقال نیروها از ناحیه در حال تسلیم خاک به اعضای ثابت مجاور که همان شمع‌ها هست، است. لذا هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی عددی موقعیت شمع‌های شناور با در نظر گرفتن سه پارامتر آرچینگ، تغییر مکان تاج شیروانی و نیز ممان خمشی در شمع، تحت شرایط لرزه‌ای می‌باشد.

مروری بر ادبیات پیشین

به‌طور کلی می‌توان گفت حضور شمع در شیروانی از دو منظر سبب پایداری شیروانی می‌گردد: الف) کاهش نیروی محرک در سطح گسیختگی محتمل و کمک به پایداری کلی شیروانی و ب) رخ دادن پدیده آرچینگ و کمک به کاهش تغییر مکان‌ها و کنترل بهتر پایداری.

در پایدارسازی شیروانی به‌وسیله شمع، یکی از مهم‌ترین پارامترها موقعیت شمع است. با رجوع به پروژه‌های انجام شده می‌توان دریافت که در اکثر مواقع از یک ردیف شمع، استفاده شده است. تغییر این پارامتر در شیروانی می‌تواند

مقدمه

با توجه به اینکه کشور ایران در منطقه‌ای زلزله‌خیز قرار گرفته لزوم توجه مهندسين به مباحث لرزه‌ای در هر پروژه-ای بیش‌ازپیش مشخص می‌گردد. در سراسر دنیا زمین‌لغزش‌های بسیاری که ناشی از زلزله است مشاهده می‌گردد. زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه سبب خسارات زیادی در دنیا شده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به زلزله چین (زلزله ونچوان^۱، ۲۰۰۸)، تایوان (زلزله چی چی^۲، ۱۹۹۹) و ژاپن (زلزله نیگاتا^۳، ۲۰۰۵) اشاره نمود. در زلزله چی چی در سال ۱۹۹۹ ($M = 7/3$) بیش از ۱۰ هزار زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی تایوان در وسعتی به میزان ۱۱ هزار کیلومتر مربع فعال گشت. در برخی از این زمین‌لرزه‌ها، دهکده‌ها به دلیل گسیختگی شیروانی‌ها زیر خاک مدفون گشتند. به‌عنوان مثال می‌توان به زمین‌لغزش بزرگی که ژانویه ۲۰۰۱ در السالوادور^۴ اتفاق افتاد اشاره کرد. ۵۰۰ نفر در این زمین‌لغزش زیر خاک دفن شدند و ۱۰۰ هزار خانه به‌طور کامل تخریب شد (ویلسون و کییفر^۵، ۱۹۸۵). بیش از ۵۰ درصد مجموع هزینه خسارات ناشی از زلزله آلاسکا^۶ در سال ۱۹۶۴ به خاطر زمین‌لغزش‌ها بوده است (جاسون و کورن^۷، ۲۰۰۱). بیش از نیمی از تلفات ناشی از زلزله در ژاپن در بازه بین ۱۹۶۴ تا ۱۹۸۰ به خاطر زمین‌لغزش‌ها اتفاق افتاده است (کوبایاشی^۸، ۱۹۸۱)؛ بنابراین بررسی پایداری لرزه‌ای می‌تواند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای تلقی گردد.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، پایدارسازی شیروانی با شمع، یکی از روش‌های معمول در سراسر دنیا طی چند دهه اخیر است. نیروی جانبی اعمال‌شده به سطح شمع‌ها سبب ایجاد ممان خمشی در طول شمع و تغییر مکان در سر شمع می‌شود. ممان مقاوم در شمع اگرچه باعث جلوگیری از حرکت شیروانی نمی‌شود ولی مقدار این حرکت را کاهش داده و از گسیختگی ناگهانی شیروانی جلوگیری می‌کند؛ البته باید به این موضوع توجه نمود که

۶. Alaska
۷. Jobson and Corne
۸. Kobayashi
۹. Al-Defae

۱. Wenchuan
۲. Chi chi
۳. Nigata
۴. El-Salvador
۵. Wilson and Keefer

در شرایط لرزه‌ای نیز، الدفاعی در سال ۲۰۱۳ به بررسی تأثیر حضور شمع در شیروانی پرداخت. او پیش از بررسی پارامترهای مدنظر خود (نظیر تغییر مکان در تاج شیروانی و یا ممان خمشی در طول شمع) بیان می‌دارد که بر اساس پژوهش‌های گذشته که در خصوص موقعیت شمع انجام گرفته به نظر می‌رسد میانه شیروانی جهت قرارگیری شمع جهت پایدارسازی شیروانی مناسب‌تر باشد. شرفی و شمس ملکی در سال ۲۰۱۸ به مطالعه اندرکنش شمع‌ها در شیروانی تحت شرایط لرزه‌ای پرداختند. آن‌ها نیز در مطالعات عددی خود موقعیت شمع را در میانه شیروانی در نظر گرفتند اما در خصوص بهینه بودن موقعیت انتخابی و دلیل انتخاب میانه شیروانی جهت قرارگیری شمع‌ها توضیحی ارائه ندادند.

تحلیل‌هایی که تاکنون در خصوص بررسی موقعیت بهینه شمع در شیروانی انجام شده، در بسیاری از موارد تحت شرایط استاتیکی بوده و موضوع حائز اهمیت، ضریب اطمینان شیروانی بوده است. درواقع جدای از اینکه از چه نوع روشی استفاده گردد توجه محققین بر این بوده است که قرارگیری شمع در چه موقعیتی بیشترین ضریب اطمینان را فراهم می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ گریفیث و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۰؛ شوش‌پاشا و امیردهی، ۲۰۱۵؛ سوآن، ۲۰۱۷). این نکته در مسائل استاتیکی پایداری شیروانی صادق است. در مسائل لرزه‌ای، بیشتر به تغییر مکان‌ها و جلوگیری از خارج شدن سازه از خدمت پذیری آن و یا به حداقل رساندن خسارات به خصوص تلفات جانی توجه می‌گردد. با توجه به این موضوع و نظر به اینکه تحقیق حاضر تحت شرایط لرزه‌ای است، موقعیت بهینه شمع به گونه‌ای تعریف شده است که ضمن توجه به پدیده آرچینگ، در ابتدا کاهش مؤثرتری در تغییر مکان ایفا کند و درعین حال نیروهای وارد بر شمع به نحوی باشد که سبب طراحی بهینه شمع‌ها گردد.

صحت سنجی

سبب کاهش یا افزایش هر کدام از موارد بالا در روند پایدارسازی شیروانی گردد. این پارامتر تابه‌حال با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل، توسط محققین متعددی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در سه پروژه‌ای که فوکووکا^۱، ۱۹۷۷ بررسی کرد، شمع‌ها در نزدیکی پنجه احداث شده‌اند. دیویس و همکاران^۲، ۲۰۰۳ موقعیت شمع را در فاصله یک سوم طول شیروانی از پنجه در پروژه‌ای اعلام نمودند. یمین^۳، ۲۰۰۷ دو پروژه با شمع در جابجایی را مورد مطالعه قرار داد که شمع‌ها در هر دو پروژه در قسمت میانی واقع شده بودند. لی و همکاران^۴، ۱۹۹۵ حالتی که شیروانی، خاکی کاملاً چسبنده^۵ و همگن داشته باشد را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که مؤثرترین موقعیت برای قرارگیری شمع‌ها، تاج و پنجه شیروانی است. مدن^۶ در سال ۲۰۰۸ به وسیله مطالعات آزمایشگاهی که انجام داد نشان داد که حضور شمع در پنجه و نیز میانه سبب بهبود در افزایش پایداری شیروانی می‌گردد. درمجموع می‌توان اذعان داشت، تعدادی از محققین میانه شیروانی را بهینه‌ترین موقعیت قرارگیری شمع (سوآن^۷، ۲۰۰۹؛ کای و یوگای^۸، ۲۰۰۰؛ وُن و همکاران^۹، ۲۰۰۵؛ وی و چنگ^{۱۰}، ۲۰۰۹؛ الیس و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۰) می‌دانند. این در حالی است که برخی دیگر پیرامون پنجه شیروانی (آسیلیو و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۱؛ نیان و همکاران^{۱۳}، ۲۰۰۸) و برخی دیگر نیز محدوده تاج شیروانی را موقعیتی بهینه برای قرارگیری شمع می‌دانند (ایتو و متسویی^{۱۴}، ۱۹۷۵؛ لی و پولوس^{۱۵}، ۱۹۹۵؛ هاسیوتیس و همکاران^{۱۶}، ۱۹۹۷؛ لی و همکاران^{۱۷}، ۲۰۱۲). این واگرایی در نتایج به این دلیل است که می‌توان روش‌های مختلفی برای تحلیل ارزیابی موقعیت بهینه شمع در شیروانی اتخاذ نمود. همچنین این واضح است که در نظر گرفتن یا نگرفتن اندرکنش میان شمع و خاک می‌تواند نتایج مختلفی را نیز در پی داشته باشد.

۱۱. Ellis et al.
۱۲. Ausilio, et al.
۱۳. Nian et al.
۱۴. Ito and Matsui
۱۵. Lee and Poulos
۱۶. Hassiotis et al.
۱۷. Li et al.

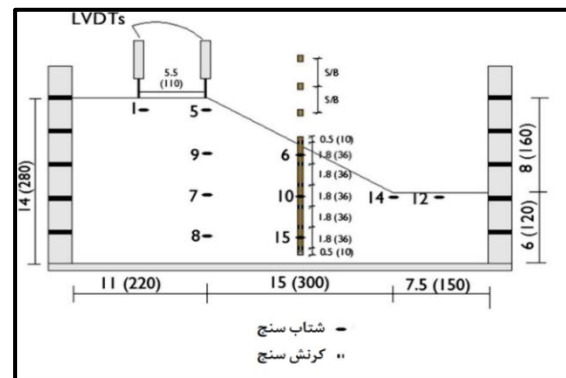
۱. Fukuoka
۲. Davies et al.
۳. Yamin
۴. Lee et al.
۵. Purely cohesive
۶. Madden
۷. Hsuan
۸. Cai and Ugai
۹. Won et al.
۱۰. Wei and Cheng

مشخصات خاک و شمع

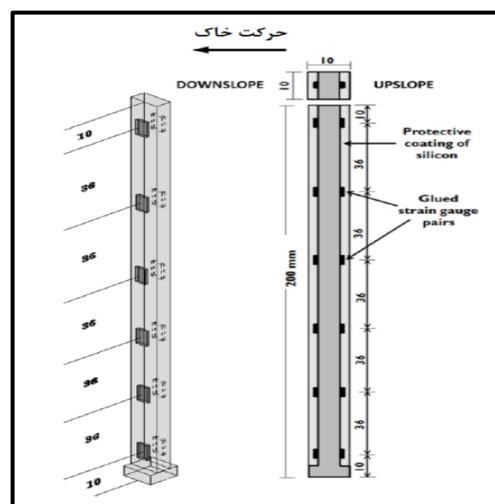
خاک استفاده شده در این آزمایش ماسه خشک است که با توجه به آن عملاً چسبندگی وجود ندارد و امکان جداشدگی در مدل‌سازی عددی داده شده است. جزییات مشخصات این خاک در جدول (۱) قابل مشاهده است. شمع‌های بکار برده شده در این آزمایش از جنس آلومینیوم هستند (جدول (۱)). استفاده از شمع با خاصیت الاستیک به جای شمع بتنی که رفتارش به صورت الاستوپلاستیک است، اگرچه نمی‌تواند صدمات وارد بر شمع و همچنین اثرات خستگی^۲ را مدل کند ولی با توجه به ممان خمشی که در شمع به وجود می‌آید، می‌توان در عمل شمع بتنی را به نحوی طراحی کرد که با توجه به ممان خمشی، شمع بتنی در محدوده رفتار الاستیک باقی بماند.

اندرکنش میان سطوح در این پژوهش به روش پنالتی^۳ صورت گرفته است. در این روش دو ضریب اصطکاک مماسی و قائم میان دو سطح تعیین می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده توسط الدفاعی، ۲۰۱۳ ضریب اصطکاک افقی بین خاک و شمع تقریباً برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک است ($\delta = 32^\circ$). به منظور جلوگیری از انعکاس موج از مرزهای دور استفاده شد. به همین دلیل طول مدل از طول واقعی ۳۳/۵ متر بیشتر در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از نرم افزار آباکوس، پژوهش الدفاعی در سال ۲۰۱۳ که یک مطالعه آزمایشگاهی است انتخاب گردید. در ادامه به شرح مراحل مدل‌سازی پرداخته و پس از حصول اطمینان از انطباق نتایج عددی و آزمایشگاهی، با عنایت به رفتار دینامیکی شیروانی به مطالعه تأثیر قرارگیری شمع در موقعیت‌های مختلف پرداخته خواهد شد. مدل‌سازی انجام شده در مطالعه حاضر، با ابعاد واقعی^۱ یعنی ۵۰ برابر ابعاد مدل آزمایشگاهی، شبیه‌سازی شده است. درواقع به دلیل آن که شتاب وارده در دستگاه سانتریفیوژ ۵۰g بوده است، بنابراین برای مدل‌سازی در ابعاد واقعی، ابعاد مدل ساخته شده در آزمایشگاه ۵۰ برابر شده است (شکل (۲)).



شکل (۲): مدل واقعی به متر و آزمایشگاهی در داخل پراتنز و به میلی‌متر است (الدفاعی، ۲۰۱۳)



شکل (۳): مدل آزمایشگاهی به میلی‌متر (الدفاعی، ۲۰۱۳)

جدول (۱): مشخصات خاک، شمع و هندسه شیروانی

پارامتر	شماره	پارامتر	مقدار
مشخصات خاک	۱	زاویه اصطکاک داخلی	۳۲
	۲	زاویه اتساع	۶
	۳	وزن مخصوص خشک $\left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right)$	۱۶/۲
	۴	مدول الاستیسیته	متغیر
	۵	E_{50}^{ref} (MPa)	۴۲/۵
مشخصات شمع	۶	جنس شمع	6063-T6 Aluminum-alloy
	۷	مدول الاستیسیته (GPa)	۶۸
	۸	ضریب پواسون	۰/۳۳
	۹	وزن مخصوص $\left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right)$	۲۷
	۱۰	ابعاد مقطع (m^2)	۰/۲۶×۰/۵
	۱۱	طول شمع (m)	۱۰
	۱۲	موقعیت شمع $\left(\frac{x_p}{L_H}\right)$	۰/۹ ، ۰/۷ ، ۰/۵ ، ۰/۳
مشخصات هندسی شیروانی	۱۳	نسبت S/D	۴/۶۷
	۱۴	زاویه شیروانی	~۲۸
	۱۵	ارتفاع شیروانی (m)	۸
اندرکنش	۱۶	ضریب اصطکاک شمع - خاک $\tan(\delta)$	۰/۶۲۵

انتخاب مدل رفتاری مناسب

در این پژوهش از مدل رفتاری موهر-کولومب استفاده شده است که در آن تغییر مدول الاستیسیته خاک با توجه به عمق در نظر گرفته نمی‌شود. این در حالی است که مدول الاستیسیته خاک طبق روابطی مانند مدل هایپربولیک^۱ که توسط دانکن و چنگ^۲ در سال ۱۹۷۰ ارائه شد در عمق تغییر می‌کند.

با عنایت به اینکه نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تغییر مدول الاستیسیته می‌تواند در نتایج تأثیر بسزایی داشته باشد، اقدام به برنامه‌نویسی به زبان فورترن^۳ در محیط ویژوال بیسیک^۴ و اتصال^۵ آن به نرم‌افزار آباکوس گردید.

به‌منظور تخمین صحیح از تغییر مدول الاستیسیته در خاک با توجه به تغییر عمق، ابتدا با مراجعه به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده^۶، رابطه E_{50} ، مربوط به مدول الاستیسیته وابسته به تنش محصورکننده در بارگذاری ابتدایی استخراج

و سپس تلاش شد تا با انجام تحلیل‌های متعدد بهترین کالبراسیون انجام گردد. رابطه‌ای که برای E_{50} در راهنمای نرم‌افزار پلکسیس^۷ آمده به‌صورت زیر است:

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{ccos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{ccos\phi + p^{\text{ref}} \sin\phi} \right)^m \quad (۱)$$

در این رابطه E_{50}^{ref} مدول الاستیسیته مبنا است که متناظر با فشار محصورکننده مبنا p^{ref} است. p^{ref} در این پژوهش مشابه با آنچه پلکسیس به‌طور پیش‌فرض در نظر می‌گیرد، ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین σ'_3 تنش اصلی حداقل است که باید توجه کرد این مقدار برای حالتی که المان موردنظر در فشار قرار گیرد، منفی خواهد بود. توان m برای خاک‌های مختلف متفاوت است. به‌عنوان مثال بهتر است برای رس نرم این عدد برابر یک در نظر گرفته شود. برای

میرایی به سیستم شیروانی - شمع از میرایی رایلی^۳ استفاده شده است. چادوری و داسگوپتا^۴ در سال ۲۰۰۳ بیان کردند که با افزایش مود، میرایی نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین به‌منظور به دست آوردن ضرایب α و β می‌توان از روابطی که آن‌ها ارائه کردند استفاده نمود:

$$\beta = \frac{2\zeta_1 w_1 - 2\zeta_m w_m}{w_1^2 - w_m^2} \quad (۴)$$

$$\alpha = 2\zeta_1 w_1 - \beta w_1^2 \quad (۵)$$

برای بدست آوردن این دو ضریب لازم است تا فرکانس‌های دو مود در نظر گرفته شود. به همین دلیل بایستی تحلیل فرکانسی انجام گردد. با انجام تحلیل فرکانسی، فرکانس مود اول و مود پنجم در حالتی که شیروانی غیرمسلح باشد، به ترتیب برابر با ۱/۶۶۷ و ۲/۷۳ هرتز بدست آمد. با در نظر گرفتن روابط (۴) و (۵)، ضرایب α و β به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۰۲۱ تعیین گردید.

نوع المان، مش‌بندی و شرایط مرزی

با مراجعه به پژوهش‌های پیشین می‌توان گفت که اکثریت قریب به اتفاق محققین از المان‌های ۶ وجهی مرتبه اول استفاده کرده‌اند. در اینجا نیز حدوداً ۱۲۳۰۰ المان (اعم از المان‌های با انتگرال‌گیری کامل و کاهش یافته) از نوع ۶ وجهی و ۳۰ المان از نوع ۴ وجهی مرتبه اول هستند.

در خصوص انتخاب نوع المان، ژو و همکاران^۴ در سال ۲۰۰۹ مطالعاتی را جهت بررسی تأثیر نوع المان بر روی ضریب اطمینان شیروانی انجام دادند. در مطالعه آن‌ها المان‌های ۴ گرهی و ۸ گرهی مربعی و نیز المان‌های ۳ گرهی و ۶ گرهی مثلثی در حالت دوبعدی مورد مقایسه قرار گرفتند. آن‌ها براساس نتایج بدست آمده استفاده از المان‌های ۴ گرهی را جهت شبیه‌سازی پایداری شیروانی توصیه کردند چراکه این نوع المان با هزینه‌های محاسباتی کم نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. در تحلیل سه‌بعدی، المان هشت گرهی آجری (C3D8) مانند المان ۴ گرهی

خاک ماسه و سیلت نروژی وون سوس^۱ (۱۹۹۰) مقادیر مختلفی را در محدوده بین $0/5 < m < 1/0$ گزارش کرد. با توجه به موارد گفته‌شده، با استفاده از رابطه ذکرشده و همچنین انجام آنالیزهای متعدد، روابط زیر برای تعیین مدول الاستیسیته تعیین شد:

الف) برای تنش فشاری کمتر از ۱۲۵ مگاپاسکال:

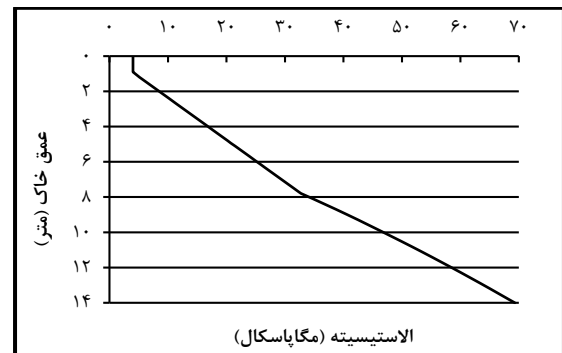
$$E_{50} = \alpha * E_{50}^{ref} \left(\frac{ccos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{ccos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \geq 4 \quad (۲)$$

که در این رابطه α برابر با ۰/۶۱، m برابر با ۱ و C برابر با ۰/۳ کیلوپاسکال است (چسبندگی ۴ الی ۵ کیلوپاسکال در مدل‌سازی عددی برای جلوگیری از واگرایی در محاسبات در نظر گرفته می‌شود).

ب) برای تنش فشاری بیشتر از ۱۲۵ مگاپاسکال:

$$E_{50} = \alpha * E_{50}^{ref} \left(\frac{ccos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{ccos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \geq 63/872 \quad (۳)$$

در این رابطه α برابر با ۲، m برابر با ۰/۵۵ و C برابر با ۰/۳ کیلوپاسکال است. در نهایت با توجه به روابط بالا نمودار تغییرات مدول الاستیسیته با توجه به تغییر عمق در شکل (۴) نشان داده شده است.

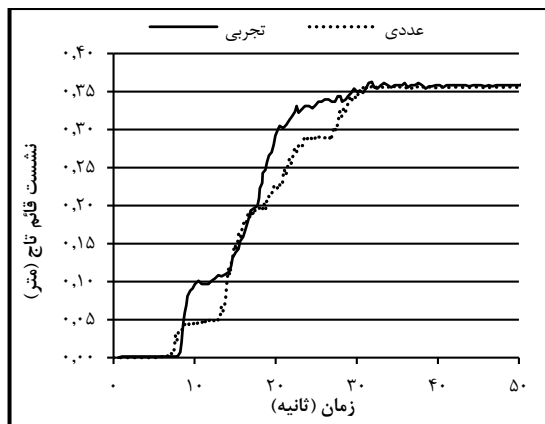


شکل (۴): تغییرات الاستیسیته نسبت به عمق (ماکسیمم عمق خاک برابر با ۱۴ متر)

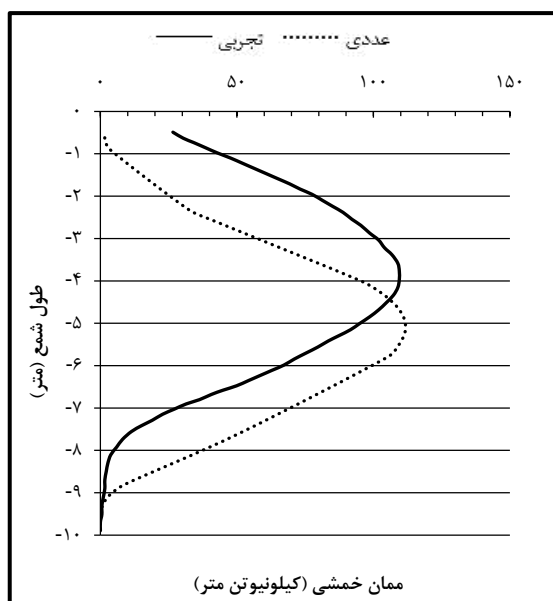
میرایی

از جمله پارامترهای مهمی که در پاسخ لرزه‌ای سیستم نقش دارد میزان میرایی است. مصالح ژئوتکنیکی که در یک محیط پیوسته بوده دارای اندرکنش میان ذرات هستند. برای اعمال

انطباق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد. این انطباق نشان می‌دهد مدل‌سازی به‌درستی انجام شده و نتایج بدست آمده از این مدل‌سازی قابل اطمینان خواهد بود.



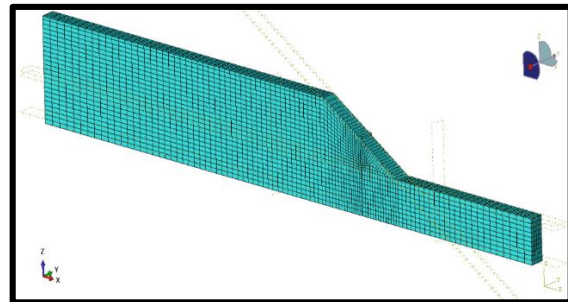
شکل (۶): مقایسه تغییر مکان تاج شیروانی در تحلیل عددی و آزمایشگاهی



شکل (۷): مقایسه ممان خمشی در طول شمع در تحلیل عددی و آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی موقعیت مناسب برای قرارگیری شمع چهار موقعیت مختلف برای شمع در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه طول افقی شیروانی $L_H = 15 \text{ m}$ است، در صورتی که فاصله شمع از پنجه شیروانی با پارامتر X_P تعیین شود، شمع در چهار موقعیت $0/5$ ، $0/7$ ، $0/9$ ، $0/3$ ، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۸) این پارامتر به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.

در تحلیل دوبعدی است (CPE4) و لذا در تحلیل حاضر این نوع المان مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۸): مش‌بندی مدل اصلی

اعمال صحیح تکیه‌گاهی یکی از مراحل مهم در مدل‌سازی تحت شرایط لرزه‌ای، است. پیش از اعمال بار دینامیکی مرزهای جانبی تنها در راستای افقی مقید شده‌اند (U1,UR2,UR3) و پایین مدل نیز گیردار فرض شد و دو مرز موجود در راستای Y نیز در همان راستا مقید شد (U2,UR1,UR3). در هنگام اعمال بار دینامیکی تمامی

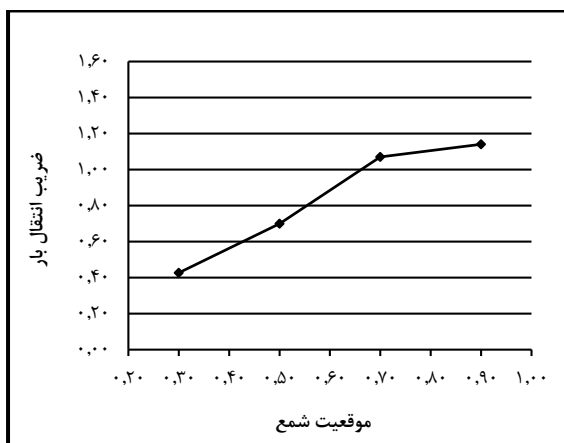
قیود مرزهای جانبی در راستای افقی آزاد شد و همچنین امکان حرکت در راستای افقی نیز در پایین مدل فراهم شد. بار لرزه‌ای وارده مطابق با تاریخچه زمانی زلزله چی چی در سال ۱۹۹۹ است.

نکته حائز اهمیت آن است که در مرحله‌ای که بار دینامیکی اعمال شد اگرچه قیود افقی مرزها در راستای X آزاد شد ولی عکس‌العمل تکیه‌گاهی به‌صورت نیروی متمرکز به آن‌ها اعمال شد. با توجه به تعداد بالای گره‌ها، اعمال این نیروهای متمرکز به گره‌های مرزی جانبی، کاری بسیار زمان‌بر است. به همین دلیل با استفاده از اسکریپت‌نویسی^۱، نیروها از آخرین اینکریمنت^۲ پیش از اعمال بار دینامیکی خوانده شده و سپس در مرحله دینامیکی با استفاده از برنامه اکسل^۳ و کدنویسی به مرزهای جانبی اعمال گردید.

مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

با توجه به مطالعه مدنظر، دو پارامتر تغییر مکان قائم تاج شیروانی و نیز ممان خمشی در طول شمع جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده از تحلیل عددی در نظر گرفته شدند. همان‌طور که در اشکال (۶) و (۷) مشاهده می‌شود

ماکسیمم است. در واقع رخ دادن این پدیده با بیشترین عملکرد (شکل (۹)) و نیز پایداری بخش پایین‌دست شمع به دلیل ارتفاع کم سبب گشته است که شیروانی در نزدیکی پنجه پایدار باشد و سطح گسیختگی محتمل متمایل به سمت بالای شیروانی گردد؛ بنابراین اگرچه آرچینگ به خوبی عمل می‌کند اما متمایل شدن سطح گسیختگی به سمت بالای شیروانی و فاصله زیاد شمع‌ها با تاج شیروانی سبب شده است که تغییر مکان قائم تاج نسبت به قرارگیری شمع در موقعیت $\frac{X_P}{L_H} = 0.5$ بیشتر شود. به دلیل عملکرد نامناسب شمع در کاهش نشست قائم تاج که از اهمیت بالایی برخوردار است، قرارگیری شمع در این موقعیت مناسب نیست. این موضوع به خوبی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با تغییر موقعیت شمع و نزدیک شدن آن به تاج شیروانی، تغییر مکان تاج شیروانی رو به کاهش خواهد رفت. این موضوع سبب می‌شود که شمع، خاک بالادست خود را به سبب آرچینگ، پایدارتر نگه دارد اما باید توجه داشت که در این حالت خاک پایین‌دست شمع دچار تغییر مکان زیاد شده و سبب می‌شود خاک بین شمع‌ها و نیز خاک پایین‌دست آن‌ها تغییر مکان بیش از حد بدهد. بنابراین اگرچه پدیده آرچینگ، سبب پایداری موضعی و کاهش تغییر مکان‌ها در محدوده بین شمع‌ها تا تاج شیروانی شده، اما دیگر این پدیده در پایداری شیروانی در محدوده بین شمع‌ها تا پنجه شیروانی عملکرد مناسبی نداشته



شکل (۹): تأثیر موقعیت شمع بر ضریب انتقال بار نهایی

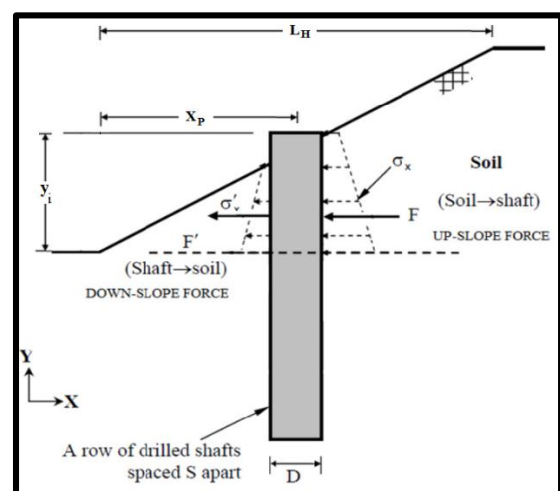
بررسی موقعیت شمع

آرچینگ بر موقعیت بهینه شمع اثرگذار است. این پدیده نخستین بار در سال ۱۹۴۳ توسط ترزاقی بیان گردید. پس‌از آن، مطالعات آزمایشگاهی اصلی توسط بوشر و گری^۱ در سال ۱۹۸۶ انجام شد تا باز توزیع تنش عمودی ناشی از آرچینگ در دستگاه دریچه^۲ شناسایی و بررسی گردد. برای آن‌که بتوان از آرچینگ در طراحی استفاده کرد لازم است این پدیده به صورت کمی تعریف گردد. یمین در سال ۲۰۰۷ یک شبیه‌سازی جامع با استفاده از روش اجزای محدود به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس تحت شرایط استاتیکی انجام داد. او برای محاسبه آرچینگ، ضریبی به نام ضریب انتقال بار تعریف نمود که پس از او عرفانی در سال ۲۰۱۱ نیز از این تعریف استفاده کرد. در این پژوهش نیز از این تعریف برای کمی کردن پدیده آرچینگ استفاده شده و ضریب انتقال بار را می‌توان صورت زیر تعریف نمود:

$$\eta = \frac{F'}{F} \quad (6)$$

$$F' = \int_0^{y_i} \int_0^S (\sigma'_x) dz dy \quad (7)$$

$$F = \int_0^{y_i} \int_0^S (\sigma_x) dz dy \quad (8)$$

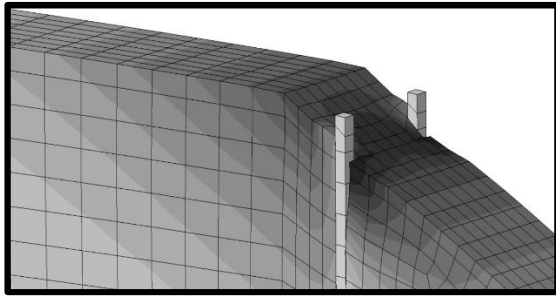


شکل (۸): نیروی بخش بالایی و پایینی شیروانی (یمین، ۲۰۰۷)

هنگامی که شمع در نزدیکی پنجه قرار دارد عملکرد آرچینگ

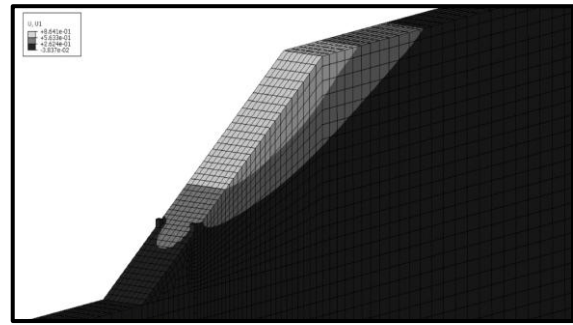
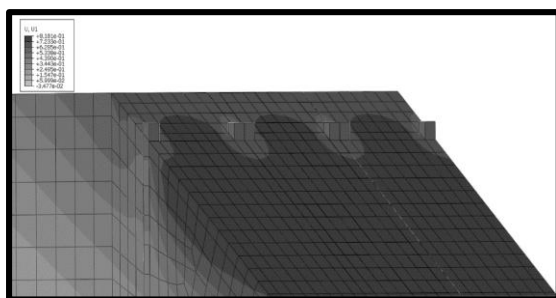
بیش از یک متوجه شد (شکل (۹)). برای درک بهتر این موضوع می‌توان به تغییر مکان‌های رخ داده در شیروانی نیز توجه نمود.

در شکل (۱۱) حضور شمع در موقعیت $\frac{X_P}{L_H} = 0.9$ سبب شده است که برخلاف بقیه موقعیت‌هایی که شمع در آن قرار گرفت و تاج شیروانی بیشترین تغییر مکان را داشت، در این حالت خاک پایین‌دست شمع تغییر مکان قائم بیشتری را نسبت به تغییر مکان قائم تاج شیروانی تجربه کند. در حالتی که شمع در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به تاج شیروانی است ($\frac{X_P}{L_H} = 0.9$)، بیشترین تغییر مکان قائم در خاک پایین‌دست شمع برابر با ۴۵/۴۴ سانتی‌متر (محل آن دقیقاً در پشت شمع است) و در خاک بالادست شمع بیشترین تغییر مکان برابر با ۳۱/۸۶ سانتی‌متر را دارد.



شکل (۱۱): رخ دادن بیشترین تغییر مکان قائم در پشت شمع در حالت $\frac{X_P}{L_H} = 0.9$

همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود اگرچه تاج شیروانی نسبت به حالتی که $\frac{X_P}{L_H} = 0.3$ باشد نیز بهتر کنترل شد اما به دلیل آن که محتمل‌ترین سطح گسیختگی در پایین‌دست شمع به وجود آمده عملاً قرار دادن شمع در این موقعیت نیز عملکرد مناسبی نخواهد داشت. در شکل (۱۲) مکان‌هایی که دارای رنگ تیره هستند محتمل‌ترین سطح گسیختگی را تشکیل داده‌اند. درواقع این نقاط، نقاطی هستند که بیشترین تغییر مکان افقی را در شیروانی متحمل شده‌اند. همان‌طور که می‌بینید سطح گسیختگی در پایین‌دست شیروانی رخ داده است.



شکل (۱۰): تأثیر موقعیت شمع بر انتقال سطح گسیختگی به بالای شیروانی در حالت $\frac{X_P}{L_H} = 0.3$

و به همین دلیل می‌توان اذعان داشت که در مجموع، آرچینگ در پایداری کلی شیروانی (به‌جز یک تأثیر موضعی در قسمت بالادست)، نقش قابل‌توجهی نخواهد داشت.

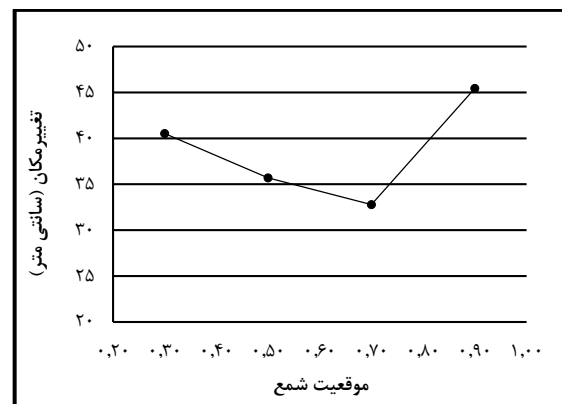
همان‌طور که در شکل (۹) مشهود است، برای ضریب انتقال بار در حالات $\frac{X_P}{L_H} = 0.7$ و $\frac{X_P}{L_H} = 0.9$ ، عددی بیش از یک بدست می‌آید که این نشان‌دهنده آن است که آرچینگ عملاً در جهت لغزش عملکرد لازم را نداشته است. هنگامی که خاک بالادست شمع تغییر مکان می‌دهد، یک نیرو از خاک بالادست شمع به شمع و خاک پایین‌دست آن اعمال می‌شود. شمع نیز به‌عنوان المانی مقاوم در مقابل این نیرو و لغزش خاک بالادست عمل کرده و یک نیروی مقاوم برشی در خلاف جهت لغزش به خاک اعمال می‌کند. این موضوع باعث می‌شود که نیروی محرکی که از شمع به خاک پایین‌دست وارد می‌شود کاهش یافته و به همین دلیل ضریب انتقال بار یا به عبارتی دیگر نسبت نیرویی که شمع به خاک پایین‌دست اعمال می‌کند به نیرویی که خاک بالادست به شمع وارد می‌کند) از یک کمتر باشد. اما با افزایش $\frac{X_P}{L_H}$ تمایل به تغییر مکان خاک پایین‌دست شمع از بالادست شمع بیشتر می‌گردد. در نتیجه این اتفاق، این بار خاک پایین‌دست شمع هست که دچار لغزش می‌گردد. با توجه به وجود پیوستگی آن در مدل‌سازی خاک پایین شمع تمایل دارد شمع و خاک بالادست را نیز ناپایدار کرده و سبب ایجاد گسیختگی در بخش فوقانی گردد. در این حالت اگرچه تا حدودی به‌صورت موضعی خاک بالادست توسط سختی شمع کنترل شده اما نتایج نشان می‌دهد که دیگر مانند حالت $\frac{X_P}{L_H} = 0.3$ نه تنها شمع نقش المانی مقاوم در برابر حرکت توده خاک را ندارد بلکه در جهت ناپایداری شیروانی به خاک، نیرو اعمال می‌کند. این موضوع را می‌توان از ضریب انتقال

شکل (۱۲): تأثیر موقعیت شمع بر انتقال سطح گسیختگی به

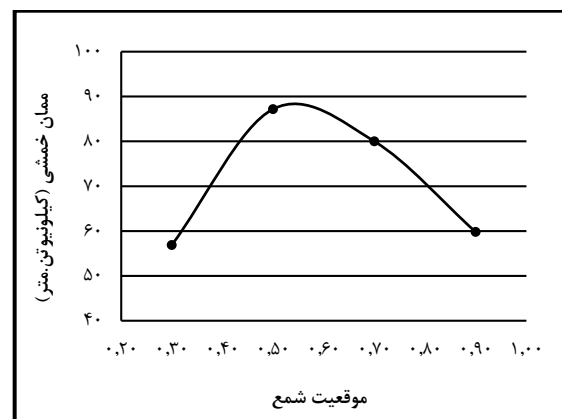
$$\frac{X_P}{L_H} = 0/9 \text{ پایین شیروانی در حالت}$$

با گذر شمع از موقعیت $\frac{X_P}{L_H} = 0/3$ به $0/5$ و $0/7$ تغییر مکان تاج شیروانی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در موقعیت $0/7$ به حداکثر میزان خود می‌رسد. همان‌طور که گفته شد در موقعیت $\frac{X_P}{L_H} = 0/9$ اگرچه تغییر مکان تاج شیروانی بهتر کنترل می‌شود ولی تغییر مکان قائم در پشت شمع بحرانی‌تر گشته و از تغییر مکان‌های قائم تاج در موقعیت‌های دیگر بیشتر می‌گردد. (شکل (۱۳)).

علاوه بر این، نتایج بدست آمده از ممان خمشی ایجاد شده در طول شمع نیز نشان می‌دهد که قرارگیری شمع در میانه بالایی شیروانی ($\frac{X_P}{L_H} = 0/5$ تا $\frac{X_P}{L_H} = 0/7$) بیشترین ممان خمشی را به شمع وارد خواهد کرد. بنابراین در شرایط برابر در صورتی که شمع در این محدوده قرار بگیرد از ظرفیت خمشی شمع استفاده حداکثری خواهد شد (شکل (۱۴)). لذا به نظر می‌رسد از این منظر نیز قرارگیری شمع در میانه بالایی بهینه‌تر باشد.

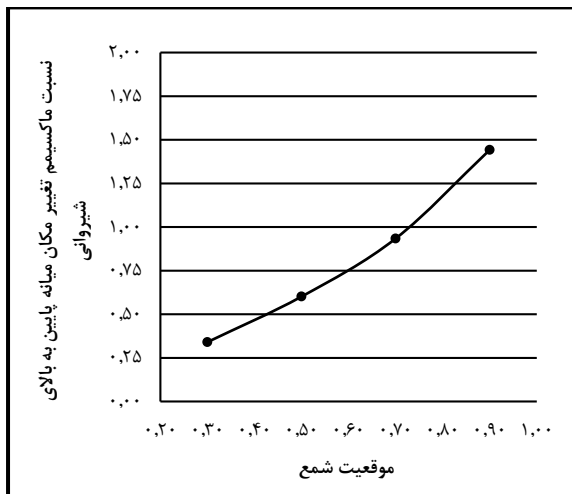


شکل (۱۳): تأثیر موقعیت شمع بر کاهش تغییر مکان قائم در شیروانی



شکل (۱۴): تغییرات ممان خمشی ماکسیمم با توجه به تغییرات

موقعیت شمع



شکل (۱۵): نسبت تغییر مکان قائم بخش تحتانی به فوقانی شمع

در نمودار شکل (۱۵)، نسبت بیشترین تغییر مکان قائم در پایین دست شمع به بیشترین تغییر مکان قائم در بالادست شمع برای موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در حالات $\frac{X_P}{L_H} = 0/3$ و نیز $\frac{X_P}{L_H} = 0/9$ نسبت بدست آمده یا از مقدار یک کمتر و یا بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که به‌طور کلی، تغییر مکان قائم یا در بخش پایین دست و یا در بالادست شمع زیاد بوده و گسیختگی شیروانی در هر دو بخش، به‌صورت هم‌زمان رخ نداده و تنها در یکی از این دو بخش، اتفاق می‌افتد. اما در موقعیت $\frac{X_P}{L_H} = 0/7$ این نسبت نزدیک به یک است. به‌عبارتی دیگر هر دو بخش پایین و بالایی شمع دارای تغییر مکان‌های قائم تقریباً یکسانی بوده و این موضوع سبب می‌گردد تا در هنگام گسیختگی هر دو بخش فوقانی و تحتانی شمع هم‌زمان در معرض گسیختگی قرار بگیرند و شیروانی عملکردی بهینه داشته باشد.

بنابراین با عنایت به مطالعات جامع و تحلیل عددی که با توجه به پدیده آرچینگ، تغییر مکان و ممان خمشی انجام شد و نتایجی که از خروجی مدل‌سازی‌ها بدست آمد (جدول (۲))، موقعیت بهینه به منظور احداث شمع‌های شناور در شیروانی، در میانه بالایی شیروانی و در محدوده

$$\frac{X_P}{L_H} = 0/7 \text{ تا } \frac{X_P}{L_H} = 0/5 \text{ می‌باشد.}$$

علائم انگلیسی و یونانی

نماد	تعریف (واحد)	نماد	تعریف (واحد)
M	بزرگی زلزله (ریشتر)	F	نیروی برآیند افقی وارد بر بخش بالایی شمع (kN)
PGA	شتاب حداکثر زمین ($\frac{m}{s^2}$)	L_f	فاصله سر شمع تا سطح گسیختگی (m)
g	شتاب گرانش ($\frac{m}{s^2}$)	L_H	طول افقی شیروانی (m)
F'	نیروی برآیند افقی وارد بر بخش پایینی (kN)	X_p	فاصله شمع از پنجه شیروانی (m)
B	موقعیت شمع درجا	D	قطر شمع درجا (m)
S	فاصله مرکز تا مرکز شمع‌های درجا (m)	UR	دوران (درجه)
c	چسبندگی خاک (kPa)	U	تغییر مکان (m)
m و α	ثوابت مدل رفتاری سخت‌شونده	E_{50}^{ref}	مدول سختی مطابق با فشار محدودکننده P^{ref} مرجع (MPa)

نماد	تعریف (واحد)	نماد	تعریف (واحد)
η	ضریب انتقال بار	φ'_{pk}	زاویه اصطکاک داخلی حداکثر خاک (درجه)
$\sigma_x = S_{11}$	تنش افقی وارد بر بخش فوقانی شمع (kPa)	β و α	پارامترهای میرایی رایلی
$\sigma'_x = S_{11}$	تنش افقی وارد بر بخش پایینی شمع (kPa)	φ'	زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک (درجه)
δ	زاویه اصطکاک خاک و شمع (درجه)	ν	ضریب پواسون
ω	فرکانس زاویه‌ای ($\frac{rad}{s}$)	ζ	نسبت میرایی بحرانی

U_{3d}/U_{3u}	تغییر مکان قائم (سانتیمتر)	ممان خمشی (کیلونیوتن. متر)	ضریب انتقال بار	موقعیت شمع
۰,۳۴	۴۰/۵۳	۵۶/۹	۰/۴۳	$\frac{X_P}{L_H} = ۰/۳$
۰/۶۰	۳۵/۷	۸۷/۲	۰/۷	$\frac{X_P}{L_H} = ۰/۵$
۰/۹۳	۳۲/۷۹	۸۰	۱/۰۷	$\frac{X_P}{L_H} = ۰/۷$
۱/۴۴	۴۵/۴۵	۵۹/۸	۱/۱۴	$\frac{X_P}{L_H} = ۰/۹$

7. Ellis, E. A. Durrani, I. K. & Reddish, D. J. (2010). Numerical modelling of discrete pile rows for slope stability and generic guidance for design. *Geotechnique*, 60(3), 185.
8. Fukuoka, M. (1977). The effects of horizontal loads on piles due to landslides. In *Proc. 10th Spec. Session, 9th Int. Conf. on SMFE* (pp. 27-42).
9. Griffiths, D. V. Lin, H. & Cao, P. (2010). A comparison of numerical algorithms in the analysis of pile reinforced slopes. *Proc. GeoFlorida*, 175-183.
10. Hassiotis, S. Chameau, J. L. & Gunaratne, M. (1997). Design method for stabilization of slopes with piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 314-323.
11. Ho, I. H. (2009). Optimization of pile reinforced slopes using finite element analyses.
12. Ho, I. H. (2017). Three-dimensional finite element analysis for soil slopes stabilisation using piles. *Geomechanics and Geoengineering*, 12(4), 234-249.
13. Ito, T. & Matsui, T. (1975). Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles. *Soils and foundations*, 15(4), 43-59.
14. Jobson, R.W. and Corne, A. J. (2001). Observations and recommendations regarding landslides hazards related to the January 13, 2001 M-7.6 El-Salvador earthquake. *USGS Report*, 01-171.
15. Joorabchi, A. E. (2011). *Landslide Stabilization Using Drilled Shafts in Static and Dynamic Conditions* (Doctoral dissertation, University of Akron).
16. Kobayashi, Y. (1981). Causes of fatalities in recent earthquakes in Japan. *Natural disaster science*, 3(2), 15-22.
17. Lee, C. Y. Hull, T. S. & Poulos, H. G. (1995). Simplified pile-slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 17(1), 1-16.
18. Li, X. Pei, X. Gutierrez, M. & He, S. (2012). Optimal location of piles in slope stabilization by limit analysis. *Acta Geotechnica*, 7(3), 253-259.
19. Madden, P. (2008). *Slope stabilisation using Piles: mini-centrifuge modelling*. MSc. Thesis. Civil Engineering Division, University of Dundee, UK.
20. Nian, T. K. Chen, G. Q. Luan, M. T. Yang, Q. & Zheng, D. F. (2008). Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in nonhomogeneous and anisotropic soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(8), 1092-1103.
21. Shooshpasha, I. & Amirdehi, H. A. (2015). Evaluating the stability of slope reinforced with one row of free head piles. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(4), 2131-2141.
22. Wei, W. B. & Cheng, Y. M. (2009). Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles. *Computers and Geotechnics*, 36(7), 1176-1185.
23. Wilson, R.C. & Keefer, D.K. (1985). Predicting areal limits of earthquake-induced land sliding in evaluating earthquake hazard in the Los Angeles region. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1360*: 317-345.
24. Won, J. You, K. Jeong, S. & Kim, S. (2005). Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems. *Computers and Geotechnics*, 32(4), 304-315.
25. Yamin, M. (2007). *Landslide stabilization using a single row of rock-socketed drilled shafts and analysis of laterally loaded drilled shafts using shaft deflection data* (Doctoral dissertation, University of Akron)

نتیجه‌گیری

تاکنون مطالعات متعددی در مورد بررسی اثر موقعیت هندسی شمع در شیروانی و دستیابی به موقعیتی بهینه انجام شده است. در این زمینه نظرات متفاوتی ارائه شده است و براساس اینکه محقق از چه روشی استفاده کند ممکن است موقعیت بهینه متفاوتی را برای شمع، بهینه اعلام کرده باشد. در مطالعه حاضر با رویکرد تغییر شرایط استاتیکی به دینامیکی و نیز منظور نمودن پدیده آرچینگ به ارزیابی موقعیت بهینه شمع پرداخته شد. به‌طور کلی می‌توان گفت عملکرد شمع در شیروانی تحت اثر دو عامل آرچینگ و کاهش نیروی محرک است. قرارگرفتن شمع در موقعیت‌های مختلف سبب می‌شود تا مقدار تأثیر هر کدام از عوامل فوق‌الذکر کاهش یا افزایش پیدا کند. به همین دلیل عملکرد مناسب یا نامناسب آرچینگ به‌تنهایی نمی‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی موقعیت بهینه شمع باشد و می‌بایستی هردو عامل به‌طور همزمان در نظر گرفته شود. به

همین دلیل در این پژوهش برای ارزیابی موقعیت بهینه شمع، تغییر مکان‌های رخ داده و همچنین ممان خمشی ایجادشده در شمع در کنار عملکرد آرچینگ، به‌عنوان معیارهایی که می‌توانند در انتخاب موقعیت بهینه شمع اثرگذار باشند، موردتوجه قرار گرفتند. با عنایت به آنچه ذکر شد، بررسی‌ها نشان می‌دهند که محل بهینه قرارگیری شمع در میانه فوقانی شیروانی و در محدوده $\frac{X_P}{L_H} = 0.5$ تا 0.7 می‌باشد.

مراجع

1. Al-Defae, A. H. H. (2013). *Seismic performance of pile-reinforced slopes* (Doctoral dissertation, University of Dundee).
2. Ausilio, E. Conte, E. & Dente, G. (2001). Stability analysis of slopes reinforced with piles. *Computers and Geotechnics*, 28(8), 591-611.
3. Cai, F. & Ugai, K. (2000). Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles. *Soils and foundations*, 40(1), 73-84.
4. Chowdhury, I. & Dasgupta, S. P. (2003). Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8(0), 1-11.
5. Davies, J. P. Loveridge, F. A. Perry, J. Patterson, D. & Carder, D. (2003). *Stabilisation of a landslide on the M25 highway London's main artery*.
6. Duncan, J. M. & Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*

Numerical investigation on the optimal location of floating piles in slope under seismic conditions

Alireza Saeedi Azizkandi^{*1}
Mohammad Hasan Baziar²
Amirhossein Kolahdouzan³
Hamed Dashtara³

Abstract

Location of floating piles is one of the main factors influencing on their optimal performance with respect to slope stability improvement. Many studies have been devoted to this concern using different analytical methods. Due to the importance of this issue in seismic conditions, still more studies are necessary and therefore, the location of floating piles has been investigated in this research using finite element method under seismic conditions. Three parameters including soil arching, crest settlement and pile bending moment has been considered in investigations. Using load transfer factor, soil arching can be suitably quantified and then utilized in numerical analyses. A comprehensive coupled numerical analysis has been carried out in order to examine the optimal location. With the purpose of considering soil's increasing elasticity modulus in depth, a FORTRAN code was developed. To obtain authentic results, modelling has been verified by comparing numerical results with an experimental research which was performed previously. The results showed that the optimal location which causes the highest stability level is the first middle of up-slope ($\frac{x_p}{L_H} = 0.5 - 0.75$).

Keywords

Soil slopes, floating piles, floating pile location, seismic excitation, numerical simulation.

1. *Assistant professor, Department of civil engineering, Iran University of Science and Technology, asaedia@iust.ac.ir.
2. Professor, Department of civil engineering, Iran University of Science and Technology.
3. Master of Science, Department of civil engineering, Iran University of Science and Technology.