

## بررسی تأثیر مکان شمع، طول شمع و شرایط سرشمع بر تقویت و تثبیت شیروانی های خاکی غیرهمگن

سیامک دیده بان ۱ و عبدالحسین پاکنژادی ۲

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز

۲-هیات علمی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی یاسوج

Didehban.abrah318@gmail.com

### چکیده

ارزیابی پایداری لرزه‌ای شیروانی های خاکی، یکی از مهم ترین مباحث مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای است. استفاده از شمع یکی از روش های رایج مسلح سازی شیروانی ها بوده. در این تحقیق به بررسی اثر تغییر پارامتر های موثر بر پایداری شیروانی خاکی غیر همگن تقویت شده با شمع تحت تحریک لرزه ای و رسیدن به بهترین حالت پایداری پرداخته شده است. برای انجام این تحقیق، با توجه به انعطاف پذیرتر و عمومی تر بودن روش اجزا محدود نسبت به سایر روش های قدیمی، بامدلسازی به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS) و روش کاهش مقاومت برشی مطالعات پارامتریک با تغییر پارامترهای موثر بر پایداری، ماندوضعیت قرارگیری نوع خاک در لایه ها و همچنین مکان، طول و شرایط سر شمع پرداخته شده و اثر هرکدام بر تغییرات ضریب اطمینان پایداری شیروانی در برابر بار لرزه ای نیز ارائه شده است که در نهایت حالت بهینه ای برای سیستم شیب/شمع بدست آمده است. افزایش طول شمع تا طول بحرانی موجب افزایش پایداری لرزه ای شیروانی(تا مرز ۵۳ درصد) گردید اما هنگامی که طول شمع از طول بحرانی بیشتر شد ، ضریب اطمینان شیروانی تقریباً به مقدار ثابتی میل کرد. همچنین استفاده از شمع در نزدیکی پنجه و تاج شیروانی باعث بهبود کمتر از ۱۰ درصدی ولی استفاده ی آن با فاصله از پنجه و تاج منجر به بهبود بیش از ۵۰ درصدی در عملکرد لرزه ای شیروانی شد. در یک طول مشخص ۱۲ متری از شمع ، استفاده از شمع در حالت سر گیردار در میانه ی شیروانی باعث بهبود ضریب اطمینان به مقدار ۳۳ درصد شد ولی در حالت سر آزاد ، این مقدار برابر ۱۸ درصد بود که نشان از برتری سرگیردار می دهد.

واژگان کلیدی: شیروانی خاکی غیر همگن، طول شمع ، مکان شمع ، ضریب اطمینان

## مقدمه

سطح زمین به صورت شیب دار که تحت زاویه ای با افق باشد، به آن شیروانی خاکی گفته می شود. شیروانی خاکی ممکن است طبیعی و یا ساخته بشر باشد. نیروهای طبیعی و غیر طبیعی می توانند باعث ناپایداری شیب ها شوند که این ناپایداری ها ممکن است موجب مرگ و میر و خرابی های زیادی شود.

یکی از نیرو هایی که ممکن است باعث گسیختگی شیروانی های خاکی و ایجاد خسارت های فراوان شود نیروی دینامیکی زلزله می باشد. در طی دهه های گذشته استفاده از شمع ها برای ایجاد ثبات در لغزش های فعال، به عنوان یک اقدام پیشگیرانه در شیروانی ها، تبدیل به یکی از تکنیک های مهم و نوآورانه در تقویت شیروانی ها شده است. این روش از سال ۱۹۵۰ در آمریکا و اروپا مورد استفاده قرار گرفته است. شمع هایی که برای پایداری شیروانی ها بکار برده می شوند به صورت مقاوم (Passive) بوده، زیرا همواره تحت تاثیر نیرو های جانبی ناشی از جابجایی افقی خاک اطراف خود می باشند. برای شمع های مقاوم مسئله مقداری پیچیده می باشد، زیرا نیرو های جانبی که به شمع وارد می شود بستگی به جابجایی خاک داشته و خود جابجایی خاک به علت حضور شمع، دستخوش تغییراتی خواهد شد. شمع با استفاده از مقاومت برشی خود در مقابل نیروها مقاومت می کند و این نوع عملکرد کاملاً با عملکرد مهار ها و میخ کوبی ها متفاوت است (پورزارع و نائینی، ۱۳۹۰).

پایداری شیب را با روش های روش تعادل حدی، تحلیل حدی، روش تفاضل محدود و روش اجزای محدود می توان تحلیل کرد. تعادل حدی اغلب روش انتخابی می باشد ولی روش اجزای محدود انعطاف پذیرتر و عمومی تر است. در روش تعادل حدی باید یک ساز و کار شکست فرض شده و سپس معادلات تعادل برای بدست آوردن بار فروریختگی بکار برده شوند. باید چندین ساز و کار شکست بررسی شده و حداقل بار لازم برای فرو ریختن، به نام بار گسیختگی اختیار گردد. روش تعادل حدی یک جواب بالا دست (جواب بزرگتر از بار واقعی گسیختگی) می دهد زیرا وجود یک ساز و کار بهتر از آنچه که فرض شده است ممکن می باشد. تحلیل حدی از مشخصات تنش- کرنش و معیار گسیختگی برای خاک استفاده می کند. جواب حاصل از تحلیل حدی یک جواب پایین دست (جواب کمتر از بار واقعی گسیختگی) ارائه می کند. در سال های اخیر، بحث تحلیل پایداری شیروانی ها با توجه به پیشرفت قابل قبول رایانه ها بیشتر توسط روش های المان محدود یا تفاضل محدود صورت می گیرد که دارای مزیت های متعددی نسبت به روش های قدیمی تر مثل تعادل حدی می باشد. از جمله این مزیت ها می توان به ایجاد سطح لغزش بحرانی به صورت خودکار با فرضیات کمتر، در نظر گرفتن اندرکنش شمع - خاک و امکان انجام مطالعه ی پارامتریک اشاره کرد. روش اجزای محدود جداسازی محیط خاک را ضروری دانسته و از خصوصیات تنش-کرنش خاک و یک معیار گسیختگی برای مشخص کردن ناحیه ای از خاک که به وضعیت تنش گسیختگی رسیده است استفاده می کند. در روش اجزای محدود لزومی ندارد که برای یک سطح گسیختگی ممکن اندیشیده شود (جمشیدی جم و توفیق، ۱۳۹۰).

عمده ترین مسئله در زمینه ی تحلیل شیروانی ها، تعیین میزان پایداری با استفاده از پارامتر ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی و تعیین تغییر شکل های ایجاد شده می باشد. باید توجه داشت که تحلیل پایداری شیروانی ها به منظور تعیین محتمل ترین فرایند گسیختگی یا به عبارتی کمترین ضریب اطمینان انجام می شود (شوش پاشا و امیردهی، ۱۳۹۲).

با توجه به وضعیت قرارگیری کشور ما در ناحیه لرزه خیزی بالا، لزوم تامین ایمنی سازه های خاکی در برابر پدیده های مخاطره آمیز طبیعی بویژه زلزله از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. امید است این مسئله در انجام کلیه ی پروژه های عمرانی مورد نظر قرار گیرد.

## پیشینه تحقیق

پور زارع و نائینی (۲۰۱۱) با استفاده از برنامه ی المان محدود آباکوس (Abaqus) رفتار لرزه ای گروه شمع در شیب های خاکی را مورد مطالعه قرار داد. پور زارع و نائینی با در نظر گرفتن اثرات فاصله ی شمع، قطر، پیکربندی گروه شمع و زاویه های متفاوت شیب های خاکی، محاسبات مربوط به پایداری را انجام دادند.

بر اساس مطالعات آن ها رفتار گروه شمع تحت بارگذاری جانبی دینامیکی به تعداد، قطر، فاصله و موقعیت شمع ها در گروه بستگی دارد. همچنین آن ها نشان دادند که رفتار گروه شمع متاثر از زاویه ی شیب است. نتایج کلی تحقیقات آن ها در زیر به طور خلاصه آورده شده است.

۱- افزایش تعداد شمع ها در گروه باعث بیشترین کاهش در تغییر مکان سر شمع و بیشترین افزایش در لنگر خمشی در طول شمع می شود.

۲- افزایش تعداد شمع ها در گروه باعث افزایش در پایداری شیروانی تحت تحریک دینامیکی می شود ولی باعث افزایش در ماکسیمم لنگر خمشی ایجاد شده در تمام شمع ها نمی شود.

۳- افزایش زاویه ی شیب شیروانی، باعث افزایش در مقادیر تغییر شکل و لنگر و تفاوت در مقادیر ذکر شده در شمع های مختلف یک گروه خاص می شود.

۴- افزایش نسبت S/D (فاصله ی شمع ها به قطر) در یک گروه خاص باعث یک افزایش در مقادیر لنگر و تغییر شکل در شمع ها و همچنین افزایش میزان تفاوت آن ها در میان شمع های یک گروه خاص می شود.

تحقیق آن ها اگر چه به بررسی شرایط خود شمع ها در شیروانی تحت بارگذاری لرزه ای پرداخت اما چیزی که کمتر در این پژوهش مورد تحلیل و توجه قرار گرفت پایداری خود شیروانی بود. همچنین در مورد شرایط متفاوت خاک شیروانی نیز بحث نشد.

خسروی و لشچینسکی (Khosravi and Leshchinsky, 2013) به مقایسه ی دو روش ارزیابی پایداری لرزه ای شیروانی یعنی روش گرانش تحریک شده و تکنیک کاهش مقاومت پرداختند و یک روش ساده برای اجرای آن ها در برنامه المان محدود آباکوس ارائه کردند. آن ها همچنین به بررسی عدم قطعیت خصوصیات مدل سازی مانند اثر اندازه ی مش و نوع مش و همچنین شرایط متفاوت فرضیات مدل مانند اثر زاویه ی اتساع و دیگر خصوصیات خاک نیز پرداختند.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که نوع و اندازه ی مش می تواند بر شتاب گسیختگی و سطح گسیختگی همراه با آن اثر قابل توجهی داشته باشد. همچنین نشان دادند که المان های مربعی کارآمدترین نوع المان بندی برای تجزیه و تحلیل پایداری شیروانی می باشد. ولی مطالعه ی آن ها فقط در زمینه ی شیب های همگن بود و به غیر همگن بودن شیروانی و شرایط مختلف لایه های خاک توجهی نکردند.

شیکو یانگ و همکاران (Shikou yang et al., 2011) روی اثر طول شمع در تقویت شیروانی ها تحت بار دینامیکی با استفاده از نرم افزار المان محدود پلاکسیس تحقیق کردند. آن ها با بررسی مدل های آنالیز شده توسط محققان پیشین مانند مدل آنالیز شده توسط کای و یوگای و مدل آنالیز شده توسط وون و همکاران به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول شمع، ضریب اطمینان آن نیز متعاقباً افزایش می یابد ولی وقتی که طول شمع به یک مقدار بحرانی رسید دیگر افزایش قابل توجهی در ضریب اطمینان مشاهده نمی شود. که آن مقدار طول را طول بحرانی نامیدند. همچنین با مقایسه ی شرایط سر شمع در دو حالت سر آزاد و سر مفصلی به این نتیجه رسیدند که در حالت سر مفصلی با افزایش طول شمع، عمق فشار ماکسیمم بر بالای شمع نیز افزایش می یابد ولی در حالت سر آزاد با افزایش طول شمع تغییر در عمق فشار ماکسیمم بر قسمت بالای شمع مشاهده نمی شود.

مطالعه ی آن ها شامل اثر بقیه ی پارامتر های موثر مثل مکان بهینه ی شمع نبود و همچنین با همگن فرض کردن لایه ی خاک در مورد عدم قطعیت خاک و لایه ای بودن آن بحثی نکردند.

ژو و همکاران (Xu, Qet al., 2009) به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر رفتار لرزه ای شیروانی های مسلح شده با میخ پرداختند. این پارامترها شامل تعدادی از پارامترهای هندسی مانند شیب شیروانی تحت بارهای دینامیکی، زاویه میخ ها و فاصله ی میخ ها در عملکرد شیروانی های میخ کوبی شده بود. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای ذکر شده در رفتار شیروانی های میخکوبی شده، از نرم افزار دو بعدی المان محدود پلاکسیس (Plaxis) استفاده کردند. همچنین آن ها نتایج خود را با آزمایش های میز لرزان انجام شده توسط محققان پیشین مقایسه کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از نرم افزار پلاکسیس تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و در برآورد تغییر مکان لرزه ای شیروانی های میخکوبی شده قابل قبول می باشد. نتایج کلی تحقیق آن ها در زیر آمده است:

۱- در شیروانی ها برای یک ضریب اطمینان یکسان، تغییر مکان شیروانی با فاصله ی میخ ۲ متر، کمتر از تغییر مکان شیروانی با فاصله ی میخ ۱/۵ متر است که دلیل این موضوع ناشی از نفوذ بیشتر میخ ها به پشت گوه ی گسیختگی در شیروانی با فاصله ی میخ ۲ متر نسبت به شیروانی با فاصله ی میخ ۱/۵ متر است.

۲- در بررسی اثر زاویه شیب مشاهده کردند که با افزایش زاویه شیب تغییر مکان شیروانی با وجود میخ هایی با طول بیشتر، به طور قابل توجهی افزایش می یابد.

۳- آن ها با بررسی چندین مدل به این نتیجه رسیدند که شیروانی هایی که میخ ها عمود بر شیب باشند، ضریب اطمینان بیشتری نسبت به شیروانی های با زاویه میخ ۱۰ درجه دارند. که دلیل آن نفوذ تعداد میخ بیشتر به پشت گوه گسیختگی، در شیروانی هایی با زاویه میخ عمود بر شیب است.

اما با مقایسه ضریب اطمینان شیروانی های پایدار شده با میخ و شیروانی های پایدار شده با شمع در برابر بارهای دینامیکی به این نتیجه می رسیم که تقویت شیروانی ها برای مقابله با بارهای دینامیکی با استفاده از شمع ها منجر به ضریب اطمینان بیشتری در مقابل لغزش های فعال می شود.

داگت و شارما (Daggett and Sharma, 2013) با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس به بررسی اثر فاصله ی شمع های مورد استفاده جهت تقویت شیروانی خاکی تحت بار جانبی دینامیکی و تنوع پیکربندی شمع ها پرداختند. مدل آن ها یک مدل دو بعدی بود و موارد مورد مطالعه در پژوهش آن ها شامل اثر نسبت فاصله به قطر شمع (S/D) و تنوع پیکربندی گروه شمع بود. آن ها در تحقیق خود کارآمدترین پیکربندی شمع ها را برای کاهش تغییر مکان نسبی به صورت ردیفی در نظر گرفتند. نتایج آن ها برای دو مورد مختلف، فاصله ی شمع و پیکربندی شمع ارائه شد که به شرح زیر می باشد:

آن ها به این نتیجه رسیدند که کمترین نسبت S/D منجر به محدود کردن جابجایی نسبی می شود و در نسبت های کوچکتر S/D، بارهای شمع در بالاترین حد خود می باشند. همچنین پیکربندی با استفاده از دو ردیف شمع بهترین عملکرد را از خود نشان می دهد.

اما با توجه به اینکه ممکن است بسیاری دیگر از پیکربندی های گروه شمع امکان پذیر باشد که به یک عملکرد بسیار بهتر منجر شود، نتایج برای تمام حالات شیروانی ها عمومیت ندارد. همچنین در این تحقیق به میزان طول شمع و تاثیر افزایش آن در کارایی بهتر سیستم شمع - شیب توجه نشده است.

### مدل سازی شیروانی مورد نظر

در این قسمت اجزای مدل سازی خاک اعم از شرایط مرزی، خصوصیات، تنش های اولیه و میرایی خاک به طور جداگانه مورد بررسی قرار می گیرد.

## مدل سازی هندسه و شرایط

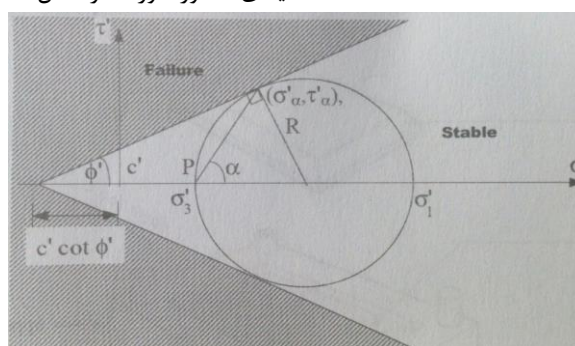
### خصوصیات خاک و هندسه مدل

برای مدل سازی رفتار الاستوپلاستیک خاک از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. که در زیر این معیار گسیختگی به اختصار شرح داده شده است.

این معیار گسیختگی در خاک زمانی که تنش های  $(\sigma'_\alpha \text{ و } \tau'_\alpha)$  روی هر صفحه به این شکل باشند، رخ خواهد داد:

(ناحیه ی هاشور خورده در شکل ۳-۱)

$$(1) \quad |\tau'_\alpha| \geq c' + \sigma'_\alpha \tan \phi'$$



شکل (۱): معیار گسیختگی موهر-کولمب (ABAQUS User's Manual)

که در آن:

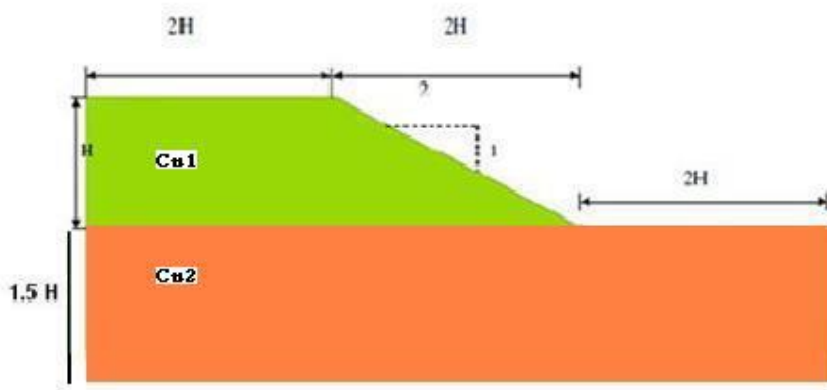
$\tau'_\alpha$ : تنش برشی موثر در گسیختگی

$c'$  و  $\phi'$ : چسبندگی و زاویه اصطکاک موثر

$\sigma'_\alpha$ : تنش نرمال موثر در گسیختگی

معیار مور-کولمب، معیاری است مبتنی بر آزمایش و عمل (مبتنی بر تجربه) یا به عبارت دیگر معیار مور-کولمب معیاری است عملی آزمایشگاهی که مشخصات خاک را بر اساس انجام آزمایش های عملی نتیجه می دهد و گسیختگی آن به شکل موضعی خطی است.

مدل شامل دو نوع خاک است که در دو لایه روی هم قرار گرفته اند.  $Cu_1$  و  $Cu_2$  مقاومت برشی زهکشی نشده ی لایه اول و دوم هستند. که مشخصات خاک لایه اول از آزمایش (داده های آزمایشگاه فنی استان فارس) و خاک لایه ی دوم از نسبت  $\frac{Cu_2}{Cu_1}$  بدست می آید. شکل (۳-۲) هندسه ی شیب غیر همگن را نشان می دهد.



شکل (۲): هندسه ی شیب غیر همگن (H=12 m)

خاک مورد استفاده در لایه اول خاک رس شهر شیراز می باشد. که از منطقه ی چپگردی ابوذر غفاری - بلوار رحمت - سه راهی دارالرحمه برداشت شده است. خاک برداشت شده از نوع CL بوده و عمق برداشت ۸ متری می باشد. پارامترهای مربوط به آن از طریق انجام آزمایش تک محوری (فشاری ساده) در آزمایشگاه فنی خاک فارس به دست آمده است. این آزمایش نوع ویژه ای از آزمایش تحکیم نیافته است که معمولاً برای نمونه های رسی مورد استفاده قرار می گیرد. در این آزمایش فشار محدود کننده صفر است. بار محوری تا ایجاد گسیختگی در نمونه به سرعت اعمال می شود.

$$Cu = q/2 \quad (2)$$

$Cu$  = مقاومت برشی زهکشی نشده (چسبندگی زهکشی نشده)

$q$  = مقاومت فشاری ساده (تک محوری)

این مقاومت با اعمال تنش محوری به نمونه استوانه ای شکل خاک بدون آنکه فشار محیطی به آن وارد شود ویا بررسی کرنش های محوری مربوط به مقادیر مختلف تنش تعیین می شود. تنشی که بر اثر آن در نمونه خاک گسیختگی رخ میدهد به نام مقاومت فشاری ساده (تک محور) نامیده شده است.

در نمونه های رسی که اشباع می باشند این مقاومت با درصد رطوبت خاک کاهش می یابد. در خاک های غیراشباع و در صورتی که وزن مخصوص خشک خاک ثابت بماند نیز این مقاومت با افزایش درجه اشباع خاک کاهش می یابد. مشخصات خاک رسی لایه اول که از مطالعات آزمایشگاهی قبلی روی این خاک بدست آمده، در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مشخصات خاک لایه اول (داده های آزمایشگاه فنی خاک استان فارس)

$E(KN/m^2)$ مدول الاستیسیته	$\gamma(KN/m^3)$ وزن مخصوص	$\nu$ ضریب پواسون	$Cu_1(KN/m^2)$ مقاومت برشی زهکشی نشده لایه اول	$\phi(^{\circ})$ زاویه اصطکاک داخلی	$\Psi$ (زاویه اتساع)	H(m) ارتفاع لایه اول
$40 \times 10^3$	۱۸	۰٫۳	۱۰۰	۰	۰	۱۲

برای انجام تحلیل در حالت های مختلف قرار گیری خاک در لایه ها مقادیر  $\frac{Cu_2}{Cu_1}$  را برابر ۰/۵ و ۲ در نظر می گیریم و با توجه به ایندو نسبت مقدار  $Cu_2$  بدست می آید.

### اعمال تنش های اولیه

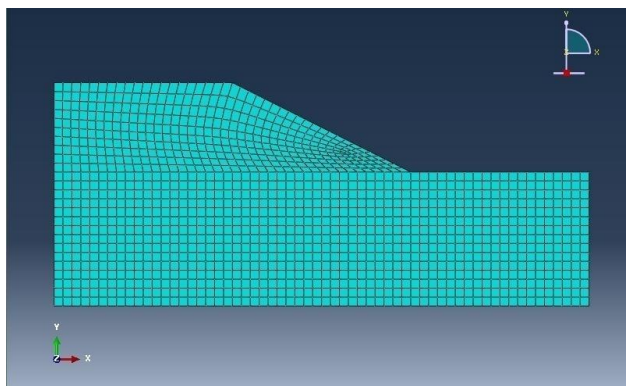
برای ایجاد حالت تنش در سیستم شمع-خاک در شرایط حقیقی برجا، استفاده از شرایط بارگذاری اولیه قبل از اعمال بار استاتیکی و دینامیکی به مدل الزامی است. این تنش ها در راستای قائم همان تنش های ژئواستاتیکی می باشند که با اعمال نیروی شتاب ثقل در جهت پایین برای ایجاد حالت تنش فزاینده با عمق به مدل اعمال می شوند. در راستای افقی نیز فشار فزاینده با عمق به اطراف مدل اعمال شده تا تنش های افقی حقیقی را شبیه سازی کند. ضریب فشار جانبی خاک با استفاده از رابطه ی (۳) -۳ بدست می آید.

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (3)$$

### المان بندی مدل خاک

برای المان بندی خاک از المان های مکعبی شکل ۴ گره ای (Q4) به ابعاد مختلف استفاده شده و اندازه ی آن ها طوری تعیین شده که تغییرات تنش و پلاستیسیته ایجاد شده در خاک را به طور مناسبی نشان دهد. تعداد المان ها نیز به نحوی انتخاب شده که هم دقت کافی و هم سرعت آنالیز را مدنظر قرار دهد. نوع المان های به کار رفته از نوع المان های کرنش صفحه ای دو بعدی (CPE4R) می باشند. (حدود ۱۰۸۰ المان از این نوع در مدل استفاده شده) در شکل (۳-۳) مدل خاک ساخته شده نشان داده شده

است. باید توجه داشت که چگالی مش مربوط به مرزها و همچنین چگالی مش مربوط به نواحی داخلی یک مدل هر دو از طریق دانه بندی های روی اضلاع مدل کنترل می شوند.



شکل (۳): مش بندی مدل خاک با المان های Q4

### شرایط مرزی مدل

شرایط مرزی مورد استفاده، در حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی با یکدیگر متفاوت هستند. در حالت استاتیکی فقط کافی است با در نظر گرفتن فاصله کافی از شمع، مرزهای خارجی در مقابل تغییر مکان عمود بر همان صفحه مقید شود. در بارگذاری دینامیکی بستن مرزها سبب ایجاد اثر جعبه ای (بازتاب امواج به درون مدل) می شود. مگر اینکه مرزها به اندازه ی کافی از شمع دور شود که اینکار سبب افزایش قابل ملاحظه زمان تحلیل می شود. لذا برای اعمال شرایط مرزی دینامیکی از مرزهای میدان جاذب (Quiet Boundry) استفاده شده است. این مرز از قابلیت نرم افزار بوده و سبب جلوگیری از انعکاس امواج اضافی به خاک می شود. برای استفاده از این مرزها، در اطراف مدل از المان های نیمه بینهایت (CINPE4) استفاده شده است (۱۰ المان از این نوع در مدل استفاده شده است). یعنی فرض می شود که مصالح خاک در جهت مورد نظر تا بی نهایت ادامه دارند و امواج حاصل از زلزله بدون انعکاس تا بینهایت در مصالح خاک منتشر می شوند. شرایط مرزی انتهایی مدل نیز با فرض قرار گرفتن لایه خاک بر روی سنگ بستر در هر سه جهت بسته شده است.

### مدل سازی شمع و شرایط سر شمع در نرم افزار

برای شمع مورد استفاده در مدل عددی رفتاری الاستیک در نظر گرفته شده است و برای مدل سازی رفتار آن از مدل الاستیک استفاده شده است. در این مدل پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون به شمع داده می شود. برای مشخصات شمع، از شمع مورد استفاده در تحقیقات ایتو و ماتسویی (Ito and Matsui, 1975) استفاده شده است. شمع مورد نظر از جنس بتنی با مدول یانگ  $E=25000 \text{ MPa}$  و ضریب پواسون  $\nu=0/2$  می باشد. برای المان بندی آن مانند خاک از المان های مکعبی ۴ گره ای شکل استفاده شده است. ابعاد این المان ها طوری انتخاب شده است که با المان های خاک اطراف آن سازگاری داشته باشند.

### یافته های تحقیق

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل هر یک از عوامل موثر بر پایداری شیروانی آنالیز شده در نرم افزار آباکوس در سه بخش شامل: مکان بهینه، طول و شرایط سر شمع آورده شده است و در پایان نیز نتایج اعتبار سنجی ارائه گردیده است.

### مکان بهینه ی شمع

نتایج حاصل از تحلیل المان محدود با استفاده از روش کاهش مقاومت برشی به لحاظ مکان شمع در شیروانی در زیر آورده شده است. که نتایج به ترتیب برای نسبت های  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 0/5$  و  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 2$  ارائه شده است. ارتباط بین ضریب اطمینان و نسبت مکان



بهینه ی  $X_p/X$  در نمودار های زیر ارائه شده است. لازم به ذکر است که شمع مورد استفاده در این مرحله به طول اولیه ۱۲ متر است. همچنین  $X_p/X = 0$  به مفهوم این است که شمع در پنجه قرار دارد و  $X_p/X = 1$  یعنی شمع در قسمت تاج است.

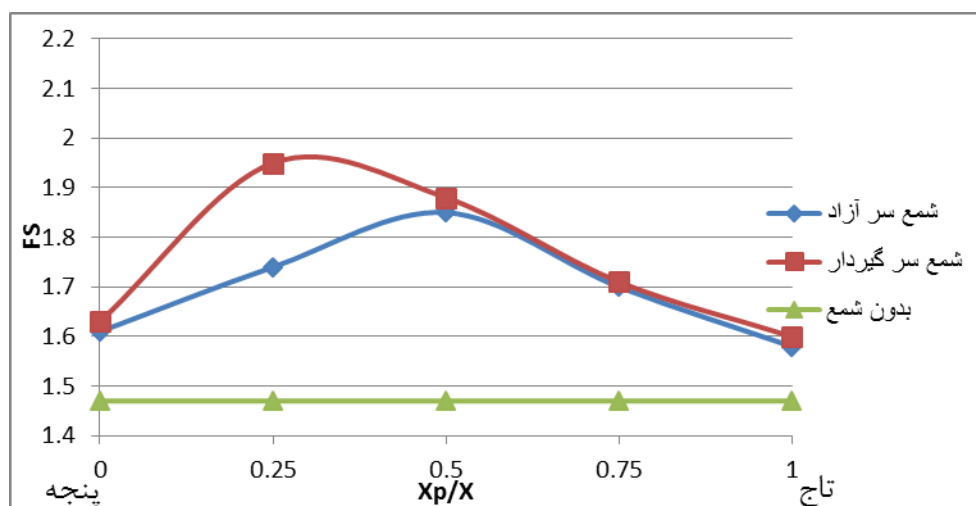
$$\text{حالت } \left( \frac{Cu_2}{Cu_1} = 0.5 \right)$$

در این حالت ، مقاومت برشی زهکشی نشده ی خاک در لایه ی دوم ضعیف تر از خاک لایه ی اول است. ضریب اطمینان شیروانی در این حالت قبل از نصب شمع با استفاده از شیوه ی کاهش مقاومت برشی و نرم افزار اجرا محدود آباکوس تحت بارگذاری دینامیکی برابر ۱/۴۷ بدست آمد. طول شمع که برای تعیین مکان بهینه ی شمع استفاده شد برابر ۱۲ متر در نظر گرفته شد. در حالت شمع سر آزاد ، بالا ترین ضریب اطمینان برابر ۱/۸۵ در هنگامی که شمع در وسط شیروانی نصب شده بود ، یافت شد. با قرار گرفتن شمع در حالت سر آزاد در دو انتهای شیروانی یعنی در پنجه و تاج ، ضریب اطمینان به ترتیب برابر ۱/۶۱ و ۱/۵۸ بدست آمد.

سپس شمع در حالت سرگیردار در شیروانی قرار گرفت که در این حالت بیشترین ضریب اطمینان موقعی رخ داد که شمع در مکان  $X_p/X = 0/25$  قرار گرفته بود یعنی در یک چهارم فاصله ی بین پنجه تا تاج شیروانی ، که این مقدار ماکسیمم برابر ۱/۹۵ بود. در این حالت ضریب اطمینان شیروانی با قرار گرفتن شمع در پنجه و تاج، نسبت به حالت سر آزاد تفاوت چندانی مشاهده نگردید.

به عبارت دیگر با قرار گیری شمع با طول ۱۲ متر ، در حالت سر آزاد در میانه ی شیروانی نزدیک به ۲۶ درصد و با قرار گیری همان شمع در حالت سر گیردار در فاصله ی  $1/4$  بین پنجه تا تاج شیروانی ، ۳۳ درصد ضریب اطمینان سیستم نسبت به حالت بدون شمع بهبود می یابد.

دو منحنی در حالت های شمع سر آزاد و سر گیردار برای بیان موقعیت بهینه ی شمع در حالت  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 0/5$  در شکل (۴) رسم شده است. بنابراین در این حالت مکان یک شمع تنها موقعی باعث بهبود ضریب اطمینان می شود که شمع از پنجه یا تاج دور باشد. زیرا هر چه شمع از پنجه یا تاج دور باشد ، توانایی بیشتری در محدود کردن سطح گسیختگی ، به سطح کوچکتری را دارد. همچنین بیشترین افزایش در ضریب اطمینان در نقطه ی یک چهارم از پنجه مشاهده شد.



شکل (۴) : تغییرات ضریب اطمینان در مکان های گوناگون قرارگیری شمع در سه حالت سر آزاد و گیردار و بدون شمع

$$\left( \frac{Cu_2}{Cu_1} = 0/5 \right)$$



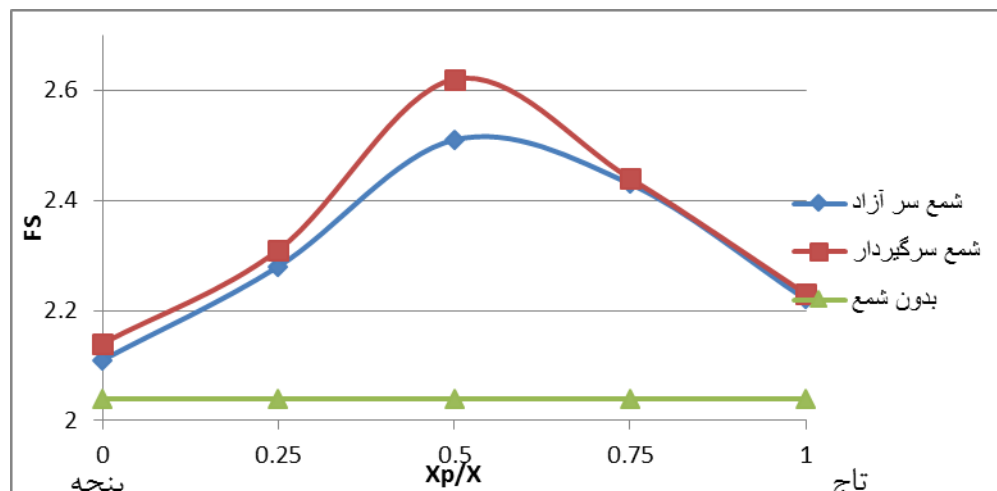
حالت  $\left(\frac{Cu_2}{Cu_1} = 2\right)$ 

در این حالت، مقاومت برشی زهکشی نشده ی خاک در لایه ی دوم قوی تر (دو برابر) از خاک لایه ی اول است. ضریب اطمینان شیروانی (FS) در این حالت قبل از نصب شمع با استفاده از شیوه ی کاهش مقاومت برشی و نرم افزار اجرا محدود آباکوس تحت بارگذاری دینامیکی برابر ۲/۰۴ بدست آمد. طول شمع که برای تعیین مکان بهینه ی شمع استفاده شد برابر ۱۲ متر در نظر گرفته شد. در حالت شمع سر آزاد، بالا ترین ضریب اطمینان برابر ۲/۵۱ در هنگامی که شمع در وسط شیروانی نصب شده بود، یافت شد. با قرار گرفتن شمع در حالت سر آزاد در دو انتهای شیروانی یعنی در پنجه و تاج، ضریب اطمینان به ترتیب برابر ۲/۱۱ و ۲/۲۲ بدست آمد.

سپس شمع در حالت سرگیردار در شیروانی قرار گرفت که در این حالت بیشترین ضریب اطمینان موقعی رخ داد که شمع در مکان  $X_p/X = 0/5$  قرار گرفته بود، که این مقدار ماکسیمم برابر ۲/۶۲ بود. در این حالت ضریب اطمینان شیروانی با قرار گرفتن شمع در پنجه و تاج، نسبت به سر آزاد شمع تفاوت چندانی مشاهده نگردید.

به عبارت دیگر با قرار گیری شمع با طول ۱۲ متر، در حالت سر آزاد در میانه ی شیروانی نزدیک به ۲۳ درصد و با قرار گیری همان شمع در حالت سرگیردار در میانه ی شیروانی، ۲۸ درصد ضریب اطمینان سیستم نسبت به حالت بدون شمع بهبود می یابد.

دو منحنی در حالت های شمع سر آزاد و سرگیردار برای بیان موقعیت بهینه ی شمع در حالت  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 2$  در شکل (۵) رسم شده است. بنابراین در این حالت نیز مانند حالت قبل، مکان یک شمع تنها موقعی باعث بهبود ضریب اطمینان می شود که شمع از پنجه یا تاج دور باشد تا سطح گسیختگی ایجاد شده را کاهش دهد. بیشترین افزایش در ضریب اطمینان در نقطه ی یک دوم از پنجه مشاهده شد. همچنین مشاهده گردید که در این حالت رابطه ی بین ضریب اطمینان و موقعیت شمع، در دو حالت شرایط سر آزاد و سرگیردار به جز در میانه شیروانی تقریباً نزدیک به هم بدست آمد که علت آن این است که کارایی شمع ها در نزدیکی پنجه و تاج نسبتاً پایین است و تاثیر چندانی در بهبود عملکرد سیستم ندارند و سطح گسیختگی ایجاد شده با قرار گرفتن شمع در این مکان ها محدود نمی شود.



شکل (۵): تغییرات ضریب اطمینان در مکان های گوناگون قرارگیری شمع در سه حالت سر آزاد و گیردار و بدون شمع

$$\left(\frac{Cu_2}{Cu_1} = 2\right)$$

طول شمع

همانطور که انتظار می رود، ضریب اطمینان شیروانی خاکی مسلح شده با شمع تمایل دارد تا با افزایش طول شمع افزایش یابد. هنگامی که طول شمع تعبیه شده از یک مقدار حدی تجاوز کند، یعنی طول بحرانی شمع تعبیه شده که ممکن است در شرایط گوناگون مقدار آن تغییر کند، ضریب اطمینان شیروانی به تدریج به یک مقدار ثابت می رسد.

به منظور مطالعه اثر طول شمع بر ضریب اطمینان، طول های مختلفی از شمع در مکان بهینه ی شمع در هر دو حالت (2 و  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 0/5$ ) در نرم افزار اجزا محدود آباکوس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

$$\text{حالت } \left( \frac{Cu_2}{Cu_1} = 0.5 \right)$$

نتایج آنالیز شیروانی تقویت شده با شمع در طول های مختلف شمع قرار گرفته در مکان بهینه ی بدست آمده در این حالت در جدول (۲) و (۳) آمده است.

جدول (۲): نتایج آنالیز شیروانی با طول های مختلف شمع در مکان بهینه ( $X_p/X=0/5$ )

طول شمع (m)	۵	۸	۱۲	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲
FS (شمع سر آزاد)	۱/۵۱	۱/۶۸	۱/۸۵	۱/۹۴	۲/۰۴	۲/۰۵	۲/۰۵
Ra (شمع سر آزاد) %	۲/۷۲	۱۴/۲۸	۲۵/۸۵	۳۱/۹۷	۳۷/۴۱	۳۹/۴۵	۳۹/۴۵
FS (شمع سر گیردار)	۱/۵۵	۱/۷۱	۱/۸۸	۱/۹۸	۲/۱	۲/۱۱	۲/۱۲
Ra (شمع سر گیردار) %	۵/۴۴	۱۶/۳۲	۲۷/۸۹	۳۴/۶۹	۴۲/۸۵	۴۳/۵۳	۴۴/۲۱

جدول (۳): نتایج آنالیز شیروانی با طول های مختلف شمع در مکان بهینه ( $X_p/X=0/25$ )

طول شمع (m)	۵	۸	۱۲	۱۶	۱۸	۲۰	۲۱
FS (شمع سر گیردار)	۱/۶۱	۱/۸	۱/۹۵	۲/۱	۲/۲۴	۲/۲۶	۲/۲۶۵
Ra (شمع سر گیردار) %	۹/۵۲	۲۲/۴۴	۳۲/۶۵	۴۲/۸۵	۵۲/۳۸	۵۳/۷۴	۵۴/۰۸

همانطور که مشاهده شد شیب نمودار طول شمع در برابر ضریب اطمینان برای حالت شمع سر آزاد و گیردار تقریباً برابر بود و یا به عبارتی طول بحرانی شمع برای هر دو حالت سر آزاد و گیردار برابر بدست آمد که این مقدار طول بحرانی برابر ۱۸ متر یافت شد. یعنی با افزایش طول شمع از ۱۸ متر ضریب اطمینان شیروانی به تدریج به یک مقدار ثابت می رسد و افزایشی در آن مشاهده نمی گردد. به عبارتی دیگر، فرض کردن طول شمع برابر با طول شیروانی که در بعضی از تحقیقات پیشین انجام می شد، یک فرض غیر منطقی و غیر اقتصادی می باشد.

در حالت بهینه و اقتصادی با قرار گیری شمعی به طول بحرانی ۱۸ متر در مکان بهینه ی یافت شده، درصد افزایش ضریب اطمینان نسبت به حالت بدون شمع، برای حالت سر آزاد ۳۷ درصد و برای حالت سر گیردار در میانه نزدیک به ۴۳ درصد و در فاصله  $\frac{1}{4}$  پنجه تا تاج شیروانی برابر ۵۳ درصد می باشد.

همچنین از این اشکال می توان مشاهده نمود که در هر میزان طول مشخص برای شمع، مقدار ضریب اطمینان در حالت سر گیردار مقداری بزرگتر از مقدار متناظر در حالت سر آزاد است. که علت آن توانایی تحمل بیشتر لنگر ها و نیرو های وارده بر شمع در حالت سر گیردار است.

<sup>۱-</sup> در این مکان بهینه بیشترین مقدار طول شمع که می تواند قرار بگیرد برابر ۲۱ متر است

$$\left(\frac{Cu_2}{Cu_1} = 2\right) \text{ حالت}$$

نتایج آنالیز شیروانی تقویت شده با شمع در طول های مختلف شمع قرار گرفته در مکان بهینه ی بدست آمده در این حالت ( $X_p/X=0/5$ ) در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴): نتایج آنالیز شیروانی با طول های مختلف شمع در مکان بهینه ( $X_p/X=0/5$ )

طول شمع (m)	۵	۸	۱۲	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲
FS (شمع سر آزاد)	۲/۲	۲/۳	۲/۵۱	۲/۹۲	۲/۹۸	۳/۰۱	۳/۰۲
Ra (شمع سر آزاد) %	۷/۸۴	۱۲/۷۴	۲۳/۰۳	۴۳/۱۳	۴۶/۰۷	۴۷/۵۴	۴۸/۰۳
FS (شمع سر گیردار)	۲/۲۸	۲/۴۱	۲/۷	۳	۳/۱	۳/۱۲	۳/۱۳
Ra (شمع سر گیردار) %	۱۱/۷۶	۱۸/۱۳	۳۲/۳۵	۴۷/۰۵	۵۱/۹۶	۵۲/۹۴	۵۳/۹۲

همانطور که مشاهده شد شیب نمودار طول شمع در برابر ضریب اطمینان برای حالت شمع سر آزاد و گیردار تقریباً برابر بود و یا به عبارتی طول بحرانی شمع برای هر دو حالت سر آزاد و گیردار برابر بدست آمد که این مقدار طول بحرانی برابر ۱۶ متر یافت شد. یعنی با افزایش طول شمع از ۱۶ متر ضریب اطمینان شیروانی به تدریج به یک مقدار ثابت می رسد و افزایشی در آن مشاهده نمی گردد. همچنین از این اشکال می توان مشاهده نمود که در هر میزان طول مشخص برای شمع، مقدار ضریب اطمینان در حالت سر گیردار مقداری بزرگتر از مقدار متناظر در حالت سر آزاد است.

در حالت بهینه و اقتصادی با قرار گیری شمع به طول بحرانی ۱۶ متر در مکان بهینه ی یافت شده، درصد افزایش ضریب اطمینان نسبت به حالت بدون شمع، برای حالت سر آزاد ۴۳ درصد و برای حالت سر گیردار نزدیک به ۴۸ درصد می باشد.

### شرایط سر شمع

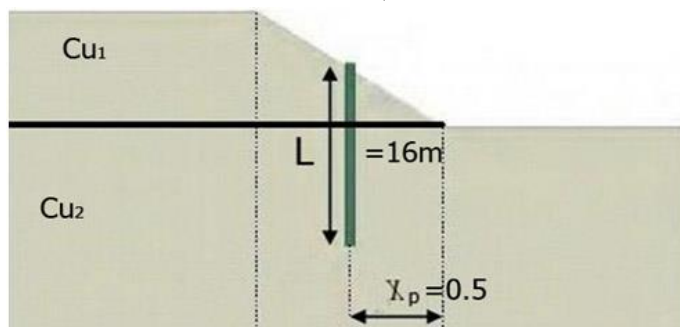
شرایط سر شمع به عنوان یک عامل مهم و موثر بر عملکرد سیستم شمع- شیروانی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش از دو حالت سر آزاد و گیردار برای شمع استفاده شده است. که طبق نتایج ذکر شده در حالت  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 0/5$  در  $X_p/X$  برابر ۰ تا ۰/۵ استفاده از سر گیردار باعث افزایش ضریب اطمینان شد. (سر گیردار ۳۳ درصد و سر آزاد ۱۸ درصد) ولی برای  $X_p/X$  برابر ۰/۵ تا ۱ تغییر چندانی در ضریب اطمینان با استفاده از سر آزاد و گیردار مشاهده نشد. همچنین در نزدیکی پنجه و تاج سد نیز سر گیردار شمع مزیت چندانی نسبت به سر آزاد آن نداشت.

در حالت  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 2$  وقتی که شمع در میانه ی شیب قرار داده شود ( $X_p/X=0/5$ ) شمع با سر گیردار منجر به ضریب اطمینان بالاتری نسبت به شمع با سر آزاد می شود (سر گیردار ۳۰ درصد ولی سر آزاد ۲۳ درصد) اما در موقعیت های دیگر شیروانی مورد مطالعه، بدون در نظر گرفتن شرایط سر شمع، تقریباً ضرایب اطمینان مشابهی برای هر دو حالت بدست آمد. همچنین در نزدیکی پنجه و تاج سد نیز سر گیردار شمع مزیت چندانی نسبت به سر آزاد آن نداشت. علت بیشتر بودن ضریب اطمینان در حالت شمع سر گیردار نسبت به حالت سر آزاد، در این است که، شمع با وضعیت گیردار، دارای توانایی بیشتری برای تحمل لنگرها و نیرو های وارده به علت بارهای اعمالی به سیستم شیب - شمع دارد.

### نتایج اعتبار سنجی

همانطور که در فصل (۳) گفته شد، جهت انجام اعتبار سنجی برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از نرم افزار المان محدود آباکوس، یک حالت از شیروانی که دارای بیشترین ضریب اطمینان است و از نظر اقتصادی به صرفه است، را توسط نرم افزار تفاضل محدود فلک (Flac) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادیم و ضریب اطمینان بدست آمده را در دو روش مقایسه نمودیم. شیروانی که جهت مقایسه سازی استفاده شد، در حالت  $\frac{Cu_2}{Cu_1} = 2$  و با قرار گیری شمع (سر گیردار) با طول بحرانی ۱۶ متر در مکان بهینه

ی ( $X_p/X=0/5$ )، در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. مشخصات خاک، شرایط مرزی و سایر پارامترها و بار لرزه ای اعمالی همان مشخصات ذکر شده در فصل (۳) که برای تحلیل در نرم افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفتند، می باشند.



شکل (۶): مدل مورد استفاده جهت تحلیل در نرم افزار فلک (Flac) و انجام مقایسه با نرم افزار آباکوس

پس از انجام تحلیل دینامیکی توسط نرم افزار تفاضل محدود فلک (Flac)، ضریب اطمینان این شیروانی از روش کاهش مقاومت برشی، برابر  $3/2$  بدست آمد که در مقایسه با ضریب اطمینان بدست آمده از تحلیل توسط نرم افزار المان محدود آباکوس ( $= 3$ )، تقریباً نزدیک به هم می باشد. ولی نتایج در نرم افزار المان محدود آباکوس به علت دارا بودن قدرت بالاتر در تحلیل مسائل تماس و دینامیکی دارای دقت بیشتری می باشد. همچنین سرعت همگرایی در روش تفاضل محدود بسیار پایین می باشد در نتیجه انجام تحلیل با این روش بسیار وقت گیر است.

### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به منظور تحلیل پایداری شیروانی خاکی مسلح شده با شمع تحت تحریک لرزه ای، از شیوه ی کاهش مقاومت برشی و نرم افزار المان محدود آباکوس در محیط دو بعدی استفاده شد. اندرکنش شمع - خاک و تحلیل همبسته در مدلسازی عددی در نظر گرفته شد. بر اساس تاثیر مکان شمع، طول شمع، شرایط سر شمع و وضعیت قرار گیری خاک در دو لایه ی شیروانی، نتیجه گیری هایی صورت گرفت که به شرح ذیل می باشد:

۱. استفاده از شمع در نزدیکی پنجه و تاج شیروانی باعث بهبود کمتر از ۱۰ درصدی ولی استفاده ی آن با فاصله از پنجه و تاج منجر به بهبود بیش از ۵۰ درصدی در عملکرد لرزه ای شیروانی شد، در نتیجه مکان یک شمع، موقعی باعث بهبود قابل توجه در عملکرد لرزه ای شیروانی خاکی می شود که شمع از پنجه و تاج شیروانی دور باشد.
۲. در حالتی که خاک لایه ی اول دارای مقاومت برشی بیشتری نسبت به لایه ی دوم است، مشاهده شد که مکان بهینه ی شمع که منجر به بیشترین ضریب اطمینان در مقابل تحریک لرزه ای می شود، در حالت شمع سر آزاد، در وسط شیروانی (یک دوم فاصله ی بین تاج و پنجه) و در حالت شمع سر گیر دار، در فاصله ی یک چهارم بین پنجه تا تاج شیروانی است. یعنی با قرار گیری شمعی با طول مشخص ۱۲ متر در این مکان بهینه در حالت سر آزاد، ۲۶ درصد و در حالت سر گیردار ۳۳ درصد باعث افزایش ضریب اطمینان سیستم شد.
۳. در حالتی که خاک لایه ی دوم دارای مقاومت برشی بیشتری نسبت به لایه ی اول است، مکان بهینه ی شمع در هر دو حالت شمع سر آزاد و گیردار در میانه ی شیب شیروانی می باشد. یعنی با قرار گیری شمعی با طول مشخص ۱۲ متر در این مکان بهینه، نزدیک به ۳۰ درصد در عملکرد لرزه ای سیستم بهبود حاصل شد.
۴. اکثر مطالعات صورت گرفته در گذشته، طول شمع را مدنظر قرار نداده اند، اما بدیهی است که طول شمع، یک عامل مهم و تاثیر گذار در سیستم شمع - شیروانی است. اغلب مطالعات طول شمع را به اندازه ی ارتفاع شیروانی در نظر گرفتند که با نتایج بدست آمده در این پژوهش، این یک فرض غیر منطقی است.

۵. افزایش طول شمع تا طول بحرانی موجب افزایش پایداری لرزه ای شیروانی خواهد شد ( تا مرز ۵۳ درصد) اما هنگامی که طول شمع از طول بحرانی بیشتر شود ، ضریب اطمینان شیروانی تقریبا به مقدار ثابتی میل خواهد کرد و موجب غیر اقتصادی شدن طرح می شود.

۶. میزان طول بحرانی شمع در هر دو حالت سر آزاد و گیردار شمع، برای حالتی که خاک با مقاومت برشی بیشتر روی خاک با مقاومت برشی کمتر قرار دارد برابر ۱۸ متر است در حالیکه این مقدار برای حالت عکس آن برابر ۱۶ متر یافت شد. یعنی حالتی که شیروانی قبل از نصب شمع ، ضریب اطمینان بیشتری دارد ، دارای مقدار طول بحرانی کمتری است که از نظر اقتصادی به صرفه تر است.

۷. استفاده از شمع سرگیردار در نزدیکی پنجه و تاج شیروانی مزیت چندانی نسبت به سر آزاد آن برای تقویت شیروانی در برابر تحریک لرزه ای ندارد ولی با نزدیک تر شدن به میانه ی شیروانی استفاده از شمع سر گیردار باعث بهبود عملکرد لرزه ای و افزایش ضریب اطمینان ، نسبت به حالت سر آزاد آن می شود(در یک طول ۱۲ متری از شمع در حالت سر گیردار ۳۳ درصد و در حالت سر آزاد ۱۸ درصد).همچنین طول بحرانی شمع در هر دو حالت شمع سر آزاد و گیردار مقدار یکسانی یافت شد که در بالا ذکر گردید.

### منابع و مأخذ

- پورزارع ج.، نائینی ا. (۱۳۹۰). تحلیل عددی رفتار لرزه ای گروه شمع در شیروانی های خاکی ومقایسه ی آن با نتایج آزمایش های مدل سازی فیزیکی .پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی .
- جمشیدی جم ،ص ،،توفیق م. (۱۳۹۰). تحلیل شیروانی های خاکی در حالت سه بعدی تحت اثر بار دینامیکی .ششمین کنگره ملی نهدسی عمران ، دانشگاه سمنان ، سمنان.
- شوش پاشا ع ،،امیردهی ح. (۱۳۹۲). بررسی پایداری شیروانی خاکی مسلح شده با شمع به روش کاهش مقاومت برشی .هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران ، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت ، زاهدان .
- عسا کره ع ،،مویزچی ا. (۱۳۹۰). تحلیل عددی پایداری شیب خاکی در اثر ایجاد سکو و مسلح شده با شمع .ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ اردیبهشت ۹۰ ، دانشگاه سمنان ، سمنان.

Daggett, A., & Sharma, S. (2013). Numerical Analysis of Pile-Reinforced Slopes. *journal of Geo-Congress* , pp. 2014-2023.

Khosravi, M., & Leshchinsky, D. (2013). Stability Analysis of Seismically Loaded Slopes Using Finite Element Techniques. *J.Geo-Congress* , pp. 1310-1319.

Xu, Q., Yin, H., & Cao, X. (2009). A temperature-driven strength reduction method for slope stability analysis. *Mech Res Commun* 36(2) , pp. 224-231.