

## نوع مقاله: علمی - پژوهشی

## چکیده

گسترش جانبی ناشی از روانگرایی خاک، اغلب باعث ایجاد خرابی‌های قابل توجهی در پی‌های عمیق پل‌ها، بندرها، سازه‌های دریایی و ساختمان‌ها می‌شود. با وجود انجام مطالعات مختلف آزمایشگاهی، عددی و صحرایی توسط پژوهشگران پیشین، همچنان رویکرد جامعی برای ارزیابی اثرات گسترش جانبی بر شمع‌ها وجود ندارد. شبیه‌سازی‌های عددی ابزارهای مهم و اقتصادی برای بررسی اثرات گسترش جانبی بر شمع‌ها هستند. در این پژوهش، به بررسی اثر شیب زمین بر روی رفتار گروه شمع‌های  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$  و  $3 \times 3$  به صورت پارامتریک و با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی پرداخته شده است. بدین منظور، ابتدا مدل عددی ساخته شده با نرم‌افزار اجزای محدود اپنسیس، با نتایج یک آزمایش میز لرزان بزرگ‌مقیاس، صحت‌سنجی شده و سپس به ازای شیب‌های مختلف زمین، پارامترهایی نظیر تغییرات فشار آب حفره‌ای، تغییرات جابه‌جایی جانبی شمع و خاک، لنگر خمشی در شمع‌ها و تغییرات شتاب شمع و خاک تحت زلزله‌ی ال‌سنتر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شیب زمین، فشار آب حفره‌ای کمتری تولید شده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای زودتر آغاز می‌شود اما جابه‌جایی جانبی شمع و خاک افزایش می‌یابد. از طرفی دو عامل در روند تغییرات و میزان جابه‌جایی‌ها نقش دارد، عامل اول تنش برشی استاتیکی در راستای شیب که اثر افزایشی بر میزان جابه‌جایی دارد و عامل دوم رفتار اتساعی خاک ناشی از تغییر شکل است که اثر کاهش‌ی بر روی روند جابه‌جایی دارد.

**واژگان کلیدی:** شیب زمین، گسترش جانبی، گروه شمع، خاک روانگرا، شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی، اپنسیس.

## تأثیر شیب زمین بر روی پاسخ دینامیکی گروه شمع‌ها در خاک قابل روانگرا بر پایه‌ی شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی

## فرامرز رنجبر

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

## علی عسگری (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران، a.asgari@umz.ac.ir

## حبیب اکبرزاده بنگر

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

## ۱- مقدمه

سواحل جنوبی و شمالی کشور و همچنین استقرار پل‌های متعدد در سواحل رودخانه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. از آنجایی که وقوع زلزله امری اجتناب‌ناپذیر است، با مشاهده خسارات قابل توجه و هزینه‌های بسیار سنگین ایجاد شده طی زلزله‌های گذشته، نیاز فراوانی به مطالعه و تحقیق در رابطه با پاسخ و رفتار شمع‌های تکی و گروه شمع‌ها تحت پدیده روانگرایی و گسترش جانبی ناشی از آن احساس می‌شود. تاکنون روش‌های تحلیل و طراحی مختلفی برای ارزیابی و تحلیل رفتار پی‌های عمیق در شرایط لرزه‌ای توسعه یافته است، با این حال کاربرد این روش‌ها در شرایط زمین روانگرا و در حال

طی زلزله‌های گذشته در سراسر جهان، پی‌های عمیق (شمع‌ها) پل‌ها، بندرها، سازه‌های دریایی و ساختمان‌ها دچار خسارت‌های جدی شده‌اند که این خسارت‌ها در زمین‌های با شیب ملایم، به دلیل گسترش جانبی ناشی از روانگرایی شدیدتر بوده است. با مشاهده این خسارات، محققین و مهندسين در دهه‌های اخیر به تحقیق و مطالعه بیشتری جهت بررسی رفتار شمع‌ها در خاک‌های ماسه‌ای با قابلیت روانگرایی و گسترش جانبی ناشی از آن و نیز اندرکنش خاک و شمع پرداخته‌اند. مسئله گسترش جانبی ناشی از روانگرایی و اثرات مخرب آن بر سازه‌ها در کشور ایران به دلیل لرزه‌خیزی بالا و وجود سازه‌ها و تجهیزات متعدد در

تفاوت در مدول برشی خاک، تنش‌های برشی ناپیوسته است. همچنین در تمامی آزمایش‌ها لنگر خمشی حداکثر، در مرز میان لایه‌ها اتفاق می‌افتد. لنگرهای خمشی و جابه‌جایی نوک شمع تا زمانی خاص افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. این کاهش در لنگر و جابه‌جایی را می‌توان به گسیختگی موضعی خاک اطراف شمع و کاهش سرعت و میزان حرکت جانبی آن مربوط دانست. در این مطالعه به منظور بررسی اثر کوبش شمع، خاک اطراف شمع را تا حدودی سیمانی نمودند. همچنین در گروه شمع‌های ۲×۲، لنگرهای خمشی در شمع بالادست و شمع پایین دست (سایه) الگویی مشابه دارند و تنها مقدار لنگر در شمع سایه کمتر مشاهده شده است.

گونزالز و همکاران [۱۲] با انجام شش آزمایش مدل فیزیکی سانتریفیوژ بر روی شمع منفرد و گروه شمع‌های ۳×۳ و ۲×۲ به بررسی اثر نفوذپذیری خاک بر گسترش جانبی پرداختند و نتیجه گرفتند که کاهش نفوذپذیری خاک (با استفاده از سیال با ویسکوزیته کمتر) باعث افزایش چند برابری جابه‌جایی کلاهک شمع و لنگر خمشی در انتهای بارگذاری می‌شود. بنابراین پیشنهاد کردند که در محاسبه‌ی لنگر خمشی و فشار وارد بر شمع‌ها در گسترش جانبی، اثر نفوذپذیری خاک در نظر گرفته شود.

تویوتا و همکاران [۱۳] با انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی میز لرزان به بررسی اثرات عوامل مختلف از جمله دامنه شتاب و فرکانس بارگذاری، شیب و تراکم خاک بر پاسخ زمین به گسترش جانبی پرداختند و نتیجه گرفتند که افزایش دامنه شتاب (از ۰/۱ g تا ۰/۵ g) و شیب زمین (از ۱۰ به ۲۰ درصد) باعث افزایش نرخ جابه‌جایی زمین شده است درحالی که تغییر فرکانس بارگذاری (از ۳ تا ۱۶ هرتز) تأثیر چندانی بر جابه‌جایی جانبی زمین نداشته است. همچنین با افزایش دانسیته‌ی نسبی خاک، جابه‌جایی زمین به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

قاسمی فرع و پاک [۱۴] به کمک نرم‌افزار اجزای محدود پیزا و مدل رفتاری منظری و دافالیاس و نیز با لحاظ کردن تغییرات نفوذپذیری ناشی از روانگرایی، مطالعه پارامتری بسیار

گسترش جانبی کماکان با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه است. دلیل این کمبود، داده‌های آزمایشگاهی و تجربی برای ارزیابی این روش‌ها و همچنین فقدان درک مکانیسم اندرکنش خاک و پی عمیق در این شرایط است.

مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای شمع‌ها تحت گسترش جانبی در خاک روانگرا، یکی از موضوعات اصلی پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای به شمار می‌رود. از جمله کارهای عددی و آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات چالولس و همکاران [۱]، فلاح‌زاده و جعفریان [۲]، سو و همکاران [۳]، هی و همکاران [۴-۵]، دوبری و همکاران [۶]، کاوند و حائری [۷]، معتمد و توهاتا [۸-۹] اشاره کرد.

حائری و همکاران [۱۰] با انجام آزمایش‌های میز لرزان بر روی گروه شمع (بدون کلاهک) و شمع منفرد، اثرات گسترش جانبی بر شمع‌ها را بررسی کردند. آنها بیان کردند که در اثر بارگذاری، روانگرایی خاک در اعماق کمتر زودتر اتفاق می‌افتد و فشار آب حفره‌ای در نزدیکی شمع‌ها (احتمالاً به دلیل ایجاد مسیر زهکشی در اثر جدایش بین خاک و شمع) زودتر مستهلک شده است. در آن پژوهش، جابه‌جایی تمام شمع‌ها بعد از چند تناوب بارگذاری به مقدار بیشینه رسید و سپس شمع‌ها کمی به عقب بازگشتند. در این حالت، لنگر خمشی وارد بر شمع کاهش یافت، درحالی که جابه‌جایی جانبی سطح زمین در حال افزایش بوده است. همچنین در آن پژوهش لنگر خمشی بیشینه در مرز بین دو لایه روانگرا و غیرروانگرا ایجاد شده بود که با نتایج بسیاری از پژوهش‌های پیشین مطابقت داشت.

عبدون و همکاران [۱۱] با انجام هشت آزمایش سانتریفیوژ بر روی شمع‌های تکی و گروه شمع به بررسی رفتار شمع‌ها تحت پدیده گسترش جانبی پرداختند. آنها در مطالعات خود پروفیل خاک با یک لایه ۶ متری خاک روانگرا شونده و یک لایه ۲ متری خاک مقاوم در برابر روانگرایی را مدل نمودند. آنها در این تحقیق بیشتر بر جنبه شبه‌استاتیکی رفتار شمع‌ها تأکید داشته و از همین رو جرمی بر روی شمع‌ها قرار ندادند. نتایج حاصله از این آزمایش‌ها حاکی از این بود که در مرز لایه‌ها به دلیل

اندر کنش فازهای جامد و سیال و به کارگیری مدل رفتاری چند سطح تسلیمی وابسته به فشار<sup>۳</sup> برای خاک که از ویژگی‌های بارز این مدل رفتاری، مدل‌سازی اتساع و روانگرایی خاک روانگرا تحت بارگذاری دینامیکی می‌باشد در نرم‌افزار اپنسیس مدل‌سازی شده است که موارد فوق را می‌توان از نوآوری‌های این پژوهش دانست.

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر شیب زمین و گسترش جانبی ناشی از آن بر روی پاسخ دینامیکی گروه شمع‌های محدود می‌باشد. بدین منظور با استفاده از تحلیل سه‌بعدی همبسته دینامیکی در حوزه زمان در نرم‌افزار اپنسیس، تأثیر شیب زمین بر روی تغییرات فشار آب حفره‌ای، تغییرات جابه‌جایی جانبی شمع و خاک، لنگر خمشی وارده به شمع از سوی خاک روانگرا و تغییرات شتاب در لایه‌های خاک بررسی شده است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش برای بررسی رفتار پی‌های عمیق در برابر بارهای جانبی ناشی از گسترش جانبی، از برنامه‌ی اجزای محدود متن‌باز اپنسیس استفاده شده است که یک برنامه‌ی اجزای محدود جامع برای مدل‌سازی پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی می‌باشد که توسط اعضای مؤسسه PEER توسعه داده شده است. این برنامه دارای قابلیت‌های متعدد برای آنالیز مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای می‌باشد که این قابلیت‌ها شامل انواع المان‌های دو بعدی و سه‌بعدی خشک و اشباع با فرمولاسیون همبسته و انواع مدل‌های رفتاری کلاسیک و پیشرفته و همچنین الگوریتم‌های مختلف برای تحلیل پاسخ غیرخطی سازه‌ها می‌باشد. در این پژوهش با توجه به زمان‌بر بودن تحلیل با برنامه‌ی اپنسیس، از برنامه‌ی اجزای محدود OpenSees (V.2.5) که توانایی محاسبات موازی را دارد، استفاده شده است [۱۹-۲۰].

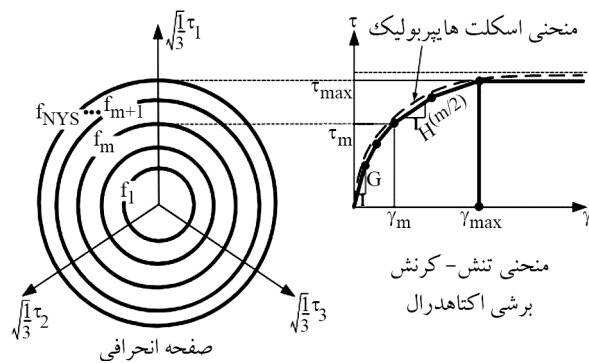
### ۲-۱- مدل‌سازی خاک و مدل رفتاری مورد استفاده

رفتار مصالح در شبیه‌سازی‌های عددی، با استفاده از مدل‌های رفتاری تحت ارتباط بین تنش و کرنش تعریف و مشخص می‌شوند.

مفصلی بر روی گسترش جانبی ناشی از روانگرایی انجام دادند. آنها در آن پژوهش تأثیر عواملی همچون شیب زمین، ضخامت لایه روانگرا شونده، تراکم نسبی خاک، شتاب بیشینه ورودی، فرکانس و تعداد چرخه‌های بارگذاری دینامیکی را بر روی مقدار جابه‌جایی زمین طی پدیده گسترش جانبی ناشی از روانگرایی بررسی نمودند. آنها رابطه جدیدی برای پیش‌بینی جابه‌جایی سطح زمین در اثر گسترش جانبی ارائه دادند و نتیجه گرفتند شیب سطح زمین تأثیر زیادی بر میزان گسترش جانبی ناشی از روانگرایی دارد و همچنین مشاهده شد که با افزایش شیب سطح زمین، میزان جابه‌جایی ماندگار در اثر روانگرایی تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. علاوه بر این آنها مشاهده کردند که مقدار فرکانس بارگذاری دینامیکی تأثیر زیادی بر جابه‌جایی ماندگار سطح زمین در اثر گسترش جانبی دارد به صورتی که اگر فرکانس بار ورودی افزایش یابد و تعداد چرخه و دامنه بارگذاری ثابت باقی بمانند، جابه‌جایی سطح زمین به طرز محسوسی کاهش خواهد یافت.

از جمله مطالعاتی که در گذشته با استفاده از نرم‌افزار OpenSees به بررسی اثر شیب زمین بر روی پاسخ دینامیکی گروه شمع‌های نامحدود<sup>۱</sup> در حالت سه‌بعدی پرداخته، می‌توان به مطالعات عسگری و همکاران [۱۵-۱۶]، الجمال و همکاران [۱۷]، هوآنگ و همکاران [۱۸] اشاره کرد. در تمامی پژوهش‌های فوق به علت پیچیدگی زیاد در تحلیل عددی و نیاز به سیستم‌های رایانه‌ای بسیار قدرتمند، محققین با بهره‌گیری از شرایط مرزی تکرار شونده<sup>۲</sup>، تنها یکی از شمع‌ها از گروه شمع محدود را مدل‌سازی و تحلیل می‌کنند، درحالی‌که در یک گروه شمع محدود، پاسخ هر شمع متناسب با موقعیت آن در گروه شمع می‌باشد و بهتر است جهت شناسایی دقیق رفتار هر شمع، تمامی شمع‌ها مدل‌سازی گردد.

در این پژوهش برخلاف پژوهش‌های گذشته، جهت بررسی رفتار دقیق شمع و خاک در زمین‌های مسطح و شیب‌دار و گسترش جانبی ناشی از آن، تمامی شمع‌ها و خاک اطراف آن به صورت یک محیط پیوسته و سه‌بعدی و با در نظر گرفتن



شکل (۳): منحنی های پیربولیک پاسخ غیرخطی تنش-کرنش خاک به همراه نمایش خطی سازی قطعه‌ای در پلاستیسیته چند سطحی [۲۷].

گسیختگی را دربر می‌گیرد. همچنین، قانون سخت‌شوندگی جنبشی<sup>۴</sup> به منظور ایجاد پاسخ هیستریزس تحت بارگذاری برشی تناوبی در این مدل لحاظ شده است. این قانون، اصلاح شده قانون اولیه مرورز [۲۱] بوده که به منظور بهبود توانمندی عددی در مدل یاد شده اعمال شده است. لازم به ذکر است که منظور از سخت‌شوندگی جنبشی، جابه‌جایی و انتقال سطوح تسلیم در فضای تنش به همراه پوش خرابی آنها می‌باشد. مدل یاد شده در حالت رفتار انقباضی خاک<sup>۵</sup>، اضافه فشار آب حفره‌ای را بر اساس کاهش نرخ تنش مؤثر محاسبه می‌کند [۲۲]، به طوری که خاک‌های اشباع، به صورت مصالح دو فاز می‌توانند بر تئوری بیوت [۲۳] برای محیط متخلخل مدل می‌شوند. فرمولاسیون عددی این تئوری که در نرم‌افزار اپنسیس به کار بسته شده است، با نام فرمولاسیون جابه‌جایی-فشار آب حفره‌ای توسط چان [۲۴] و زینکوویچ [۲۵] ارائه شده است. این فرمولاسیون، در روش اجزای محدود به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$M\dot{U} + \int B^T \sigma' dV + QP - f^{(s)} = 0 \quad (1)$$

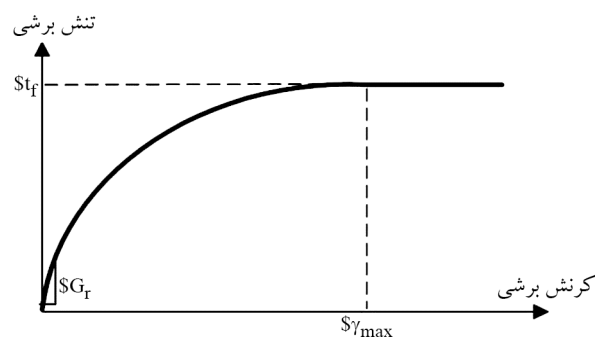
که در این رابطه  $M$  ماتریس جرم،  $U$  بردار جابه‌جایی و  $B$  ماتریس کرنش جابه‌جایی می‌باشند. به همین ترتیب،  $\sigma$  نماینده بردار تنش مؤثر بوده که با استفاده از مدل مشخصه ارائه شده در رابطه (۲) قابل محاسبه هستند.

$$Q^T \dot{U} + SP + HP - f^{(p)} = 0 \quad (2)$$

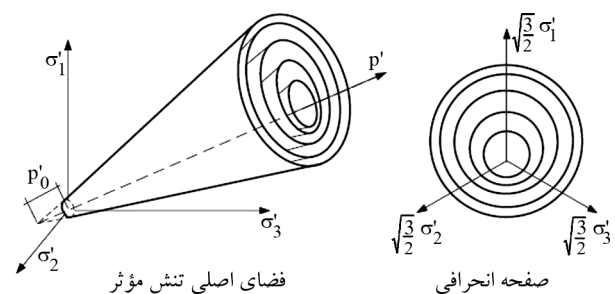
که در آن  $Q$  عملگر گرادیان مجزا جهت همبستگی فازهای جامد

این مدل‌های رفتاری هسته اصلی روش‌های عددی را تشکیل می‌دهند. تقریباً تمامی مدل‌های رفتاری برای خاک‌های مستعد روانگرایی بر پایه‌ی پلاستیسیته با مدل‌سازی فشار آب حفره‌ای بنا نهاده شده‌اند که این امر با توجه به کرنش‌های برگشت‌ناپذیر در این نوع از خاک‌ها، با رفتار واقعی خاک تطابق دارد.

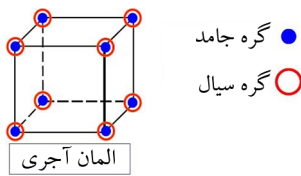
در این پژوهش برای شبیه‌سازی ویژگی‌های رفتاری خاک روانگرا، از مدل چند سطح تسلیمی وابسته به فشار استفاده شده است که یک مدل الاستوپلاستیک می‌باشد. قابلیت مدل‌سازی اتساع و روانگرایی که در خاک‌های ماسه‌ای در طول بارگذاری سیکنی اتفاق می‌افتد، از ویژگی‌های بارز این مدل رفتاری می‌باشد. در شکل (۱) منحنی شماتیک تنش-کرنش این مدل رفتاری نشان داده شده است. مؤلفه‌های اصلی این مدل رفتاری شامل تابع تسلیم، قانون سخت‌شوندگی و قانون جریان می‌باشد. توابع تسلیم انتخاب شده در این مدل، شامل یک سطح مخروطی در فضای تنش بوده (شکل ۲) و قله‌ی آن در امتداد محوری هیدرواستاتیکی قرار دارد. در تاریخچه پلاستیسیته چند سطحی، تعدادی از سطوح تسلیم مشابه به همراه قله‌های مشخص و اندازه‌های متفاوت، منطقه سخت‌شوندگی را تشکیل می‌دهند (شکل ۳) که پوش



شکل (۱): نمودار شماتیک تنش-کرنش مصالح با سطح تسلیم چندگانه [۲۷].



شکل (۲): سطح تسلیم مخروطی در فضای تنش اصلی و صفحه‌ی انحرافی [۲۷].



شکل (۴): المان آجری هشت گره‌ای خاک [۲۷].

در نظر گرفته شده است. همچنین برای کاهش اثر شرایط مرزی از المان‌های با ابعاد بزرگ‌تر در نزدیکی مرزها استفاده شده است [۴، ۱۷]. شکل (۵) و شکل (۶) به ترتیب نحوه‌ی مش‌بندی گروه شمع‌ها و خاک اطراف آن را از نمای سه‌بعدی و از نمای جانبی نشان می‌دهد. ذکر این نکته هم لازم است که به دلیل متقارن بودن مدل، فقط نصف مدل در نظر گرفته شده است. با توجه به دقت پاسخ‌ها، زمان تحلیل و امکانات محاسباتی موجود، مدل نهایی گروه شمع  $1 \times 1 \times 2$  و  $3 \times 3$  به ترتیب از  $3840$  و  $4020$  المان آجری هشت گره‌ای تشکیل شده است. قابل ذکر است در حال حاضر با توجه به اینکه نرم‌افزار اپنسیس قابلیت مش‌بندی محیط خاک و شمع را ندارد، لذا در این پژوهش از نرم‌افزار GiD برای مش‌بندی محیط خاک و شمع استفاده شده است.

## ۲-۲- مدل‌سازی شمع‌ها

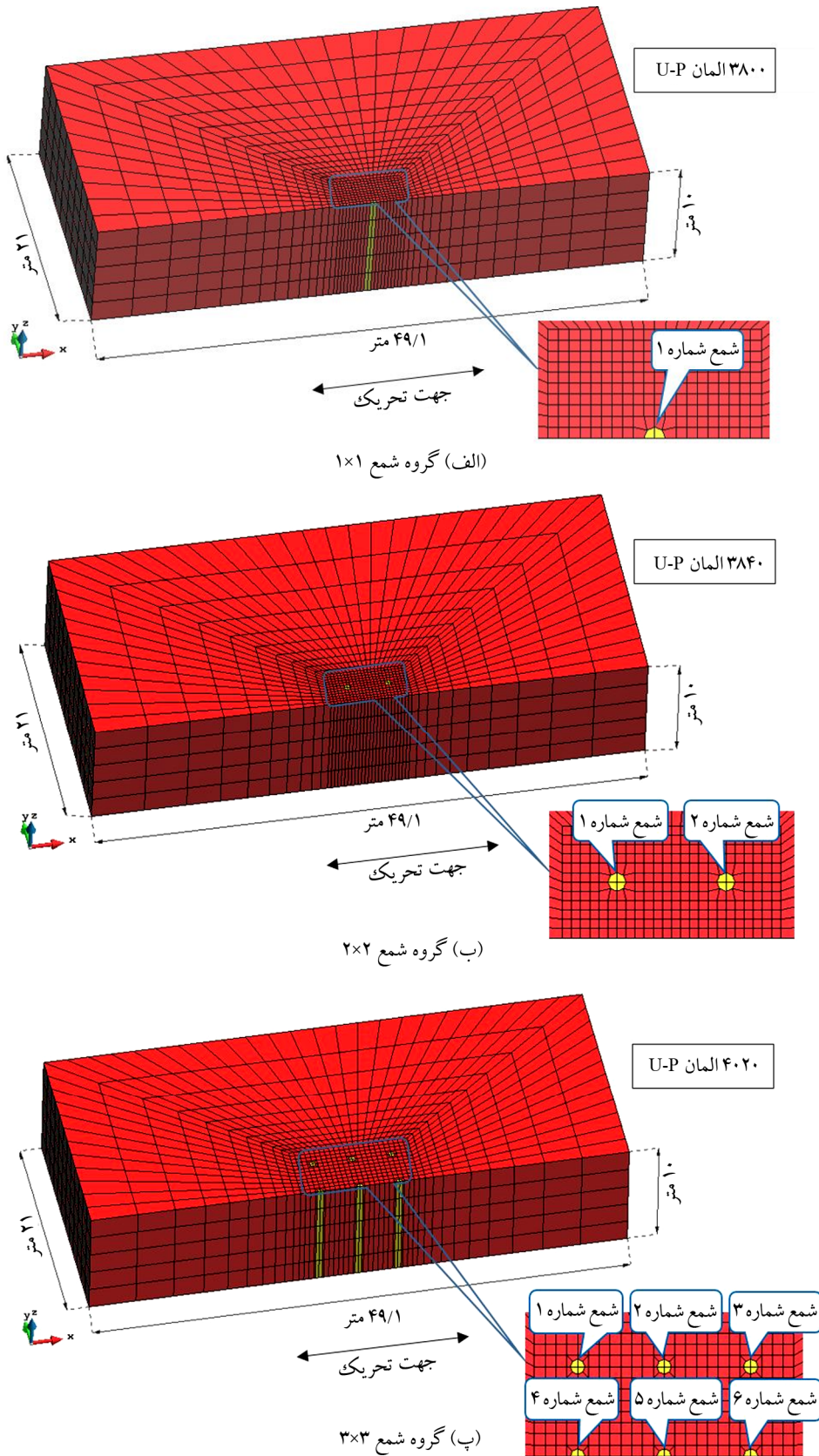
در این شبیه‌سازی عددی، مقطع تمامی شمع‌ها به صورت دایره‌ای توپر با قطر  $60$  سانتیمتر و طول  $10$  متر و جنس شمع‌ها طبق جدول (۲) از نوع بتنی درجاریز و تنها با مقاومت اتکایی  $6$  در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی مرکز تا مرکز شمع‌ها  $3/6$  متر می‌باشد. برای مدل‌سازی شمع‌ها از المان تیر-ستون با  $6$  درجه آزادی ( $3$  درجه آزادی مربوط به تغییر مکان و  $3$  درجه آزادی مربوط به دوران) استفاده شده است. رفتار شمع‌ها در مراحل بارگذاری به صورت غیرخطی و با در نظر گرفتن اثر کماتش پی-دلتا می‌باشد. همچنین در مدل‌سازی شمع‌ها، جرم شمع به صورت جرم متمرکز در گره‌های المان شمع در نظر گرفته شده است. جهت اتصال المان‌های شمع به خاک، مطابق شکل (۷) با استفاده از یک سری المان‌های صلب از نوع المان تیر-ستون هر نقطه از المان شمع به نقاط هم‌تراز از المان‌های خاک اطراف شمع متصل می‌گردد.

و مایع،  $P$  بردار فشار آب حفره‌ای،  $H$  ماتریس نفوذپذیری و  $S$  ماتریس تراکم‌پذیری هستند. در این راستا پارامترهای  $f^{(P)}$  و  $f^{(S)}$  جهت معرفی اثرات نیروهای حجمی و شرایط مرزی اعمالی برای فازهای جامد-مایع و مایع تعیین شده‌اند.

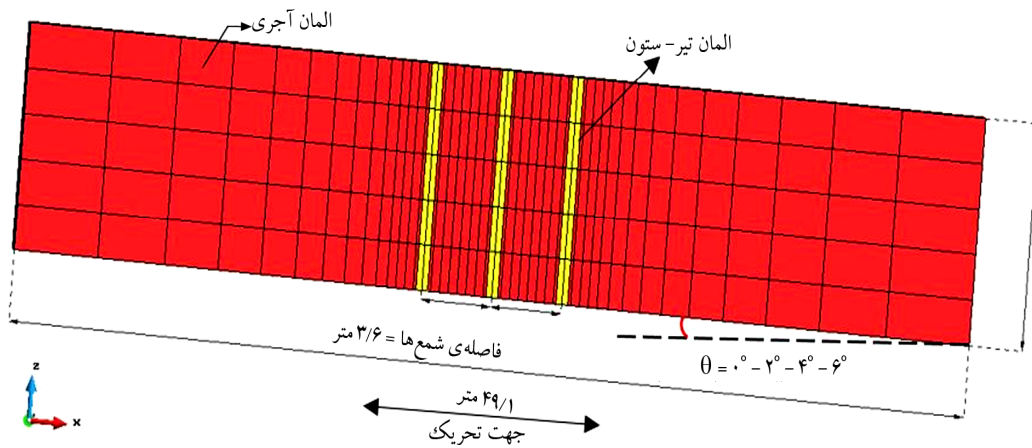
در این پژوهش برای بررسی اثر شیب زمین بر روی رفتار شمع‌ها، از یک لایه خاک ماسه‌ای اشباع (سطح تراز آب زیرزمینی هم‌تراز با سطح زمین می‌باشد) به ضخامت  $10$  متر در بالای سنگ‌بستر و با شیب‌های  $0^\circ$ ،  $2^\circ$ ،  $4^\circ$  و  $6^\circ$  درجه نسبت به افق، جهت شبیه‌سازی گسترش جانبی، استفاده شده است. خاک مورد استفاده در این پژوهش از نوع ماسه نوادا با تراکم نسبی  $40\%$  درصد می‌باشد که مشخصات پارامترهای مدل رفتاری آن جهت استفاده در نرم‌افزار اپنسیس در جدول (۱) ارائه شده است. برای مدل‌سازی لایه خاک، از المان‌های آجری هشت گره‌ای، که هر گره دارای  $4$  درجه آزادی ( $3$  درجه آزادی مربوط به تغییر مکان و  $1$  درجه آزادی مربوط به فشار آب حفره‌ای) می‌باشد، استفاده شده است، بنابراین این المان امکان ثبت تغییرات فشار آب حفره‌ای در حین بارگذاری را نیز علاوه بر تغییر شکل در سه جهت فراهم می‌کند. در شکل (۴) این المان نشان داده شده است. همچنین در این پژوهش برای کاهش اثر مرزها بر روی پاسخ شمع‌ها، طول مدل  $49/1$  متر و عرض آن  $21$  متر

جدول (۱): مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی ماسه نوادا [۱۷، ۲۲].

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
جرم مخصوص اشباع	$\rho$	تن بر مترمکعب	$1/9$
ضریب نفوذپذیری	$k$	متر بر ثانیه	$6/6 \times 10^{-5}$
فشار مرجع	$P'_f$	کیلوپاسکال	$80$
مدول برشی	$G$	مگاپاسکال	$78/5$
زاویه اصطکاک	$\varphi$	درجه	$31/4$
زاویه تغییر فاز	$\varphi_{PT}$	درجه	$26/5$
پارامتر انقباضی	$c_1$	-	$0/3$
پارامتر اتساعی اول	$d_1$	-	$0/4$
پارامتر اتساعی دوم	$d_2$	-	$2$
پارامتر روانگرایی اول	$l_1$	کیلوپاسکال	$10$
پارامتر روانگرایی دوم	$l_2$	بدون بعد	$0/001$
پارامتر روانگرایی سوم	$l_3$	بدون بعد	$1$

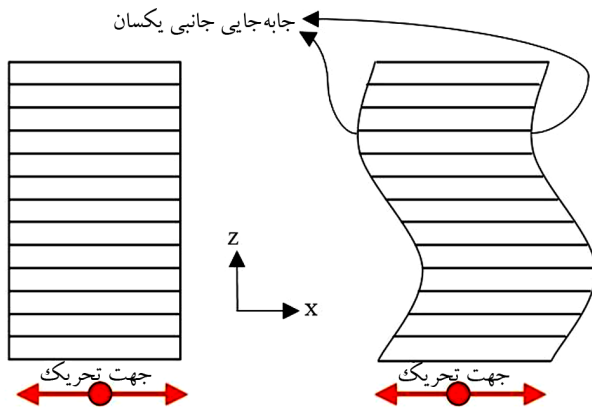


شکل (۵): نحوه مش بندی گروه شمع و خاک اطراف آن از نمای سه بعدی.



شکل (۶): مش بندی خاک و گروه شمع ۳×۳ از نمای جانبی.

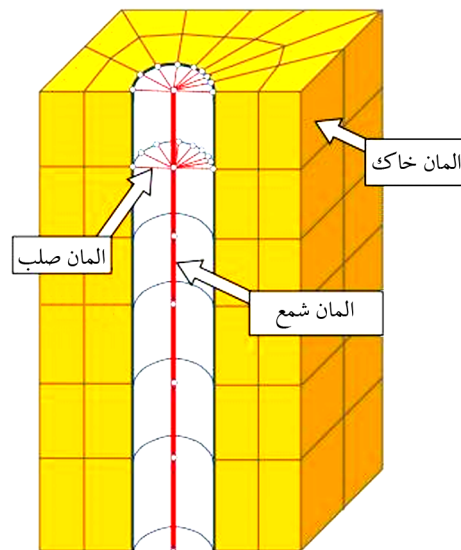
مدل‌های عددی مورد بررسی، شرایط مرزی تکرار شونده برای خاک در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن این شرایط مرزی در مدل‌سازی، تغییر مکان تمامی گره‌های دو طرف مدل در ارتفاع‌های یکسان در جهت عمود بر محفظه بر جداره بسته شده است. همچنین مرز پایینی کاملاً ثابت و بدون تغییر مکان (صلب) می‌باشد. زهکشی آب فقط از مرز بالایی (سطح زمین) صورت می‌گیرد و بقیه مرزها کاملاً نفوذناپذیر هستند. در شکل (۸) فرم تغییر شکل یافته‌ی خاک از نمای جانبی تحت شرایط مرزی تکرار شونده نشان داده شده است.



شکل (۸): فرم تغییر شکل یافته‌ی خاک از نمای جانبی تحت شرایط مرزی تکرار شونده [۲۷].

جدول (۲): مشخصات مکانیکی شمع بتنی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی.

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
جرم مخصوص شمع	$\rho$	تن بر مترمکعب	۲/۴
مدول الاستیسیته	k	کیلو پاسکال	$۲ \times ۱۰^۷$
مدول برشی	G	کیلو پاسکال	$۸/۳۳ \times ۱۰^۶$



شکل (۷): نحوه‌ی اتصال المان صلب به المان خاک [۱۸].

### ۳-۲- شرایط مرزی

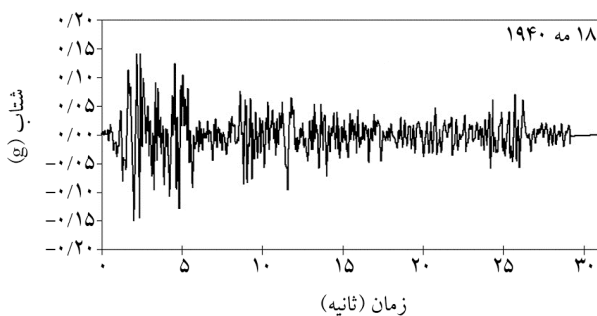
در آزمایش میز لرزان بزرگ مقیاس هی و همکاران [۴] که در بخش راستی آزمایی این پژوهش، برای راستی آزمایی مدل‌های عددی استفاده شده است، شرایط مرزی جعبه آزمایش از نوع شرایط مرزی تکرار شونده [۲۸-۲۹] می‌باشد، به همین دلیل در

### ۲-۴- روش تحلیل

در این پژوهش جهت تحلیل دینامیکی مدل، چهار مرحله در نظر گرفته شده است.

جدول (۳): پارامترهای شتاب‌نگاشت انتخابی.

پارامترهای حرکت زلزله	نماد	واحد	El Centro/N-S
زمان وقوع	-	-	1940-05-18
ایستگاه ثبت زلزله	-	-	117 El Centro
بزرگای زلزله	$M_w$	ریشتر	۷/۱
بیشینه شتاب زمین	PGA	g	۰/۳۱۴
نسبت بیشینه سرعت به بیشینه شتاب زمین	PGV/PGA	-	۰/۱۱۳
زمان متناظر با بیشینه شتاب افقی	$t_p$	ثانیه	۲/۰۲
پریود غالب	$T_p$	ثانیه	۰/۵
شدت آریاس	$I_a$	متر بر ثانیه	۱/۱۱
سرعت تجمعی مطلق	CAV	متر بر ثانیه	۹۹۰/۲۹۱
تعداد سیکل‌های معادل زلزله	$N_c$	-	۱۴/۵



شکل (۹): تاریخچه شتاب افقی زلزله ال سنترو.

## ۲-۶- مدل‌سازی میرایی

در این پژوهش میرایی در نظر گرفته شده برای سیستم، میرایی رایلی است که معمولاً در مسائل حوزه زمان از آن استفاده می‌شود. در نرم‌افزار اپنسیس میرایی رایلی طبق رابطه (۳) تعیین می‌شود:

$$[C] = \alpha_m [M] + \alpha_k [K] \quad (3)$$

که در آن  $[C]$  ماتریس میرایی،  $[M]$  ماتریس جرم،  $[K]$  ماتریس سختی،  $\alpha_m$  و  $\alpha_k$  ضرایب ماتریس میرایی می‌باشند. در این پژوهش علاوه بر میرایی هیستریزس لحاظ شده در مدل رفتاری مورد استفاده، میرایی رایلی متناسب با سختی برابر با  $0/002$  نیز به منظور کاهش خطاهای فرکانس بالا در مدل تعریف شده است. البته تعریف یا عدم تعریف این میرایی در روند کلی

- مرحله اول: در این مرحله المان‌های خاک با رفتار الاستیک تحت تحلیل وزنی قرار می‌گیرند تا شرایط طبیعی زمین (تنش‌های اولیه) به وجود آید.

- مرحله دوم: در این مرحله به منظور بررسی اثر گسترش جانبی، شیب مدل تعریف می‌شود، برای این کار توزیع بار یکنواخت در جهت محور X به مدل اعمال می‌شود، همچنین در انتهای این مرحله رفتار مصالح خاکی از حالت الاستیک به حالت الاستوپلاستیک تبدیل می‌شود تا امکان بررسی شرایط پلاستیک در روانگرایی به وجود آید.

- مرحله سوم: در این مرحله المان‌های شمع در داخل محیط خاک تعریف می‌شود و با اعمال بار استاتیکی، آنالیز استاتیکی انجام می‌شود تا توزیع تنش و تغییر مکان در خاک در حالت وجود شمع تعیین شود. قابل ذکر است در سه مرحله اول، از تحلیل گذرای متغیر<sup>۷</sup> موجود در نرم‌افزار اپنسیس با گام‌های زمانی بزرگ استفاده شده است، زیرا گام‌های زمانی بزرگ از ایجاد فشار آب حفره‌ای اضافی در مرحله‌ی تحلیل وزنی جلوگیری می‌نماید.

- مرحله چهارم: در این مرحله کل مجموعه (خاک و شمع) تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرد.

## ۲-۵- انتخاب شتاب‌نگاشت

در این پژوهش در تحلیل تاریخچه زمانی از شتاب‌نگاشت مقیاس شده زلزله‌ی ال سنترو با مدت‌زمان ۳۱ ثانیه و حداکثر دامنه‌ی  $0/15$  g به عنوان تحریک ورودی استفاده شده است که پارامترهای شتاب‌نگاشت مورد نظر در جدول (۳) ارائه شده است. این شتاب‌نگاشت در انتهای مدل و در جهت طولی (در جهت شیب) اعمال شده است. علت انتخاب این شتاب‌نگاشت، وقوع پدیده روانگرایی به صورت گسترده و جابه‌جایی‌های جانبی بزرگ در اثر وقوع این زلزله می‌باشد. در شکل (۹) تاریخچه زمانی این شتاب‌نگاشت به عنوان تحریک ورودی نشان داده شده است.





شکل (۱۰): میز لرزان و جعبه‌ی خاک مورد استفاده در آزمایش‌هی و همکاران [۴-۵].

جعبه مورد استفاده در این آزمایش از نوع جعبه برشی لایه‌ای به طول ۱۲ متر، عرض ۳/۵ متر و ارتفاع ۶ متر می‌باشد. همچنین جهت بررسی پدیده گسترش جانبی، شیب جعبه آزمایش ۲ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱) هندسه کلی آزمایش و محل ابزار اندازه‌گیری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل خاک مورد استفاده از یک لایه خاک ماسه‌ای اشباع با ضخامت ۵ متر و تراکم نسبی ۴۰ درصد تشکیل شده است. در این آزمایش از دو عدد شمع از نوع لوله فولادی به قطر ۰/۳۱۸ متر و با ضخامت‌های ۶ و ۳ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین قبل از ایجاد لایه خاک، با انجام تست پوش آور سختی شمع‌ها و سختی اتصال شمع‌ها تعیین شده است. در جدول (۴)

جواب‌ها تأثیر چندانی ندارد، اما وجودش می‌تواند نویزهای احتمالی در پاسخ‌های به‌دست‌آمده را کاهش دهد [۵].

## ۲-۷- روش حل معادلات

در این پژوهش به علت پیچیده بودن معادلات حرکت، حل تحلیلی این معادلات بسیار دشوار است، به این منظور می‌توان از روش‌های عددی گام‌به‌گام زمانی استفاده نمود. یکی از این روش‌های پرکاربرد برای حل معادلات، روش نیومارک است. در این پژوهش از این روش برای حل معادلات استفاده شده است. پارامترهای نیومارک تأثیر به‌سزایی بر روی پایداری و کاهش نوسانات نتایج دارد. در این تحقیق همواره از پارامترهای نیومارک زیر استفاده شده است [۵، ۱۷].

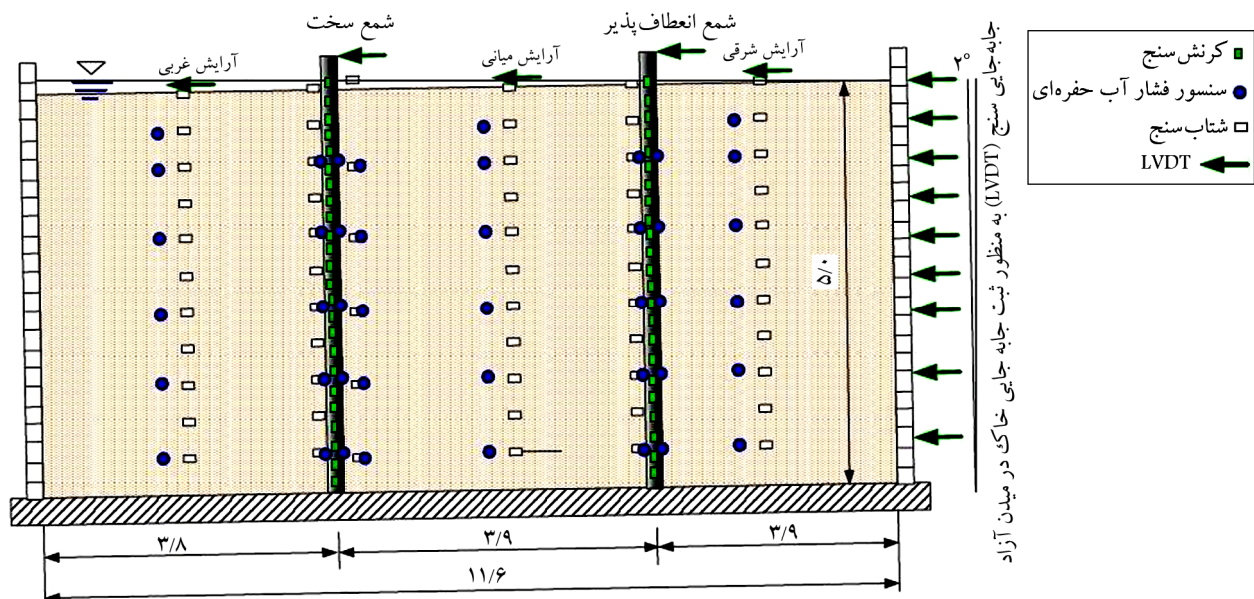
$$\alpha = 0.3025$$

$$\beta = 0.6$$

## ۳- راستی آزمایشی

### ۳-۱- معرفی آزمایش میز لرزان هی و همکاران [۴]

با توجه به پیچیدگی مدل‌سازی عددی سیستم خاک و گروه شمع به‌صورت سه‌بعدی، برای حصول اطمینان از درستی مدل‌سازی، نتایج عددی با نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی میز لرزان بزرگ مقیاس هی و همکاران [۴] که در مرکز تحقیقات NIED ژاپن انجام شده، مقایسه گردیده است (شکل ۱۰).



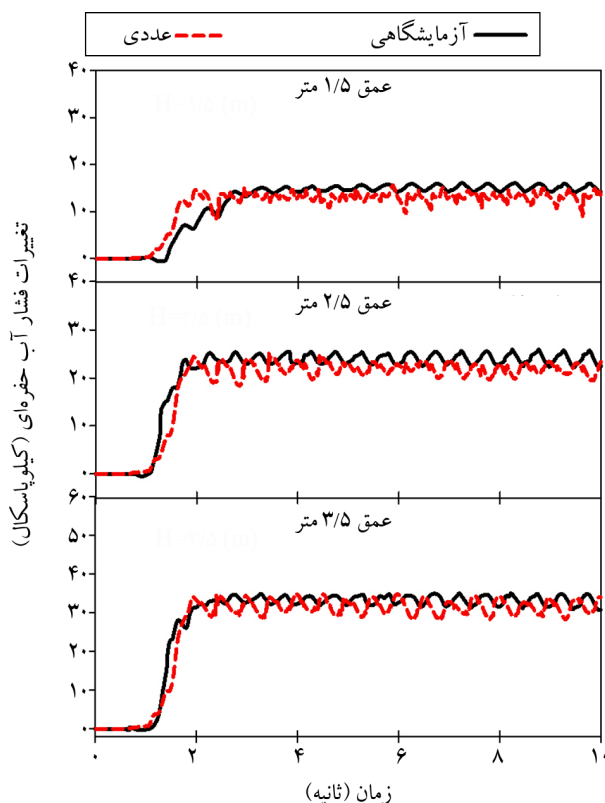
شکل (۱۱): هندسه کلی و موقعیت ابزار اندازه‌گیری آزمایش میز لرزان هی و همکاران [۴].

جدول (۴): مشخصات شمع‌ها و نتایج آزمایش پوش‌آور استاتیکی ۴-۵.

نوع شمع	طول شمع (متر)	قطر شمع (متر)	ضخامت (متر)	سختی شمع (کیلو نیوتن بر متر مربع)	سختی اتصال (کیلو نیوتن در متر بر رادیان)
شمع سخت	۵/۵	۰/۳۱۸	۰/۰۰۶	۱۴۳۲۰	۱۸۵۰۰
شمع انعطاف پذیر	۵/۵	۰/۳۱۸	۰/۰۰۳	۷۳۶۰	۸۵۰۰

فشار آب حفره‌ای تولید شده در حین بارگذاری، در شکل (۱۳) نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش میز لرزان در عمق‌های مختلف از میدان آزاد ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر و روند پیش‌بینی شده تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین در شکل (۱۴) تاریخچه‌ی زمانی لنگر خمشی در شمع سخت در عمق ۴/۷۵ متری ارائه شده است که دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

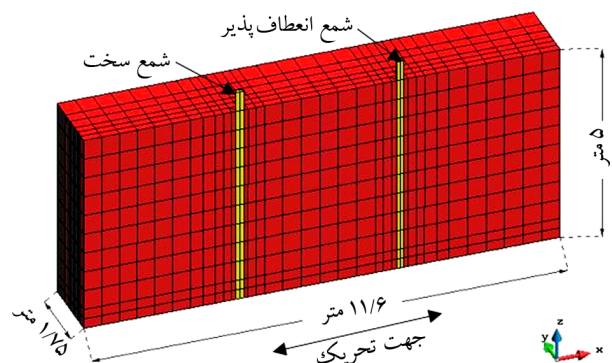
شکل (۱۵) تاریخچه زمانی شتاب خاک در عمق‌های مختلف از میدان آزاد که حاصل از مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): تغییرات فشار آب حفره‌ای خاک در میدان آزاد در عمق‌های مختلف (West array).

مشخصات شمع‌ها و نتایج حاصل از تست پوش‌آور استاتیکی ارائه شده است. در این آزمایش تحریک ورودی از نوع سینوسی با فرکانس ۲ هرترز و دامنه‌ی ۰/۲ g استفاده شده است.

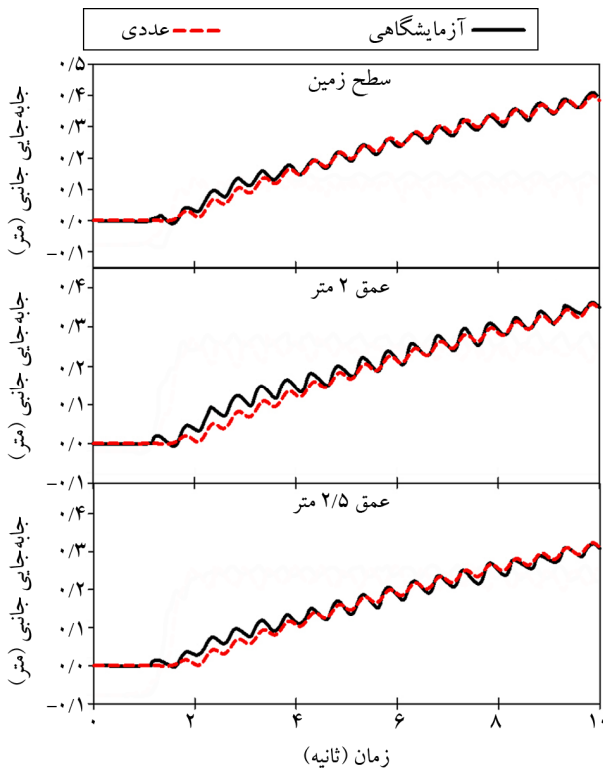
در این پژوهش جهت راستی‌آزمایی آزمایش میز لرزان‌هی و همکاران در نرم‌افزار اپنسیس، ابعاد مدل مطابق با ابعاد واقعی آزمایش در نظر گرفته شده است. شبکه‌ی اجزای محدود به کار رفته در این مدل‌سازی، متشکل از ۳۲۰۶ گره و ۲۳۳۲ المان مکعبی هشت‌گه‌ای می‌باشد که توسط نرم‌افزار جی‌آی‌دی ایجاد شده است. نحوه‌ی مش‌بندی شمع و خاک اطراف آن در نرم‌افزار اپنسیس در شکل (۱۲) نشان داده شده است. برای مدل‌سازی شمع‌ها از ۱۲ المان تیر-ستون غیرخطی با مقطع فایبر که توانایی مدل‌سازی رفتار غیرخطی را دارند، استفاده شده است. همچنین جهت مدل‌سازی سختی اتصال شمع در انتهای مدل، از المان‌هایی به طول صفر که در کتابخانه اپنسیس موجود است، استفاده شده است.



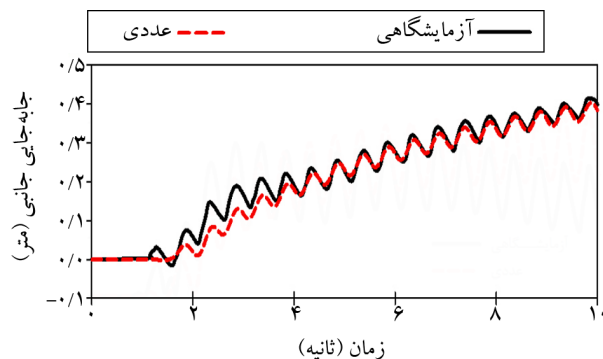
شکل (۱۲): نحوه مش‌بندی شمع و خاک اطراف آن در مدل‌سازی عددی.

### ۳-۲- نتایج راستی‌آزمایی

به‌منظور بررسی صحت نتایج مدل عددی در پیش‌بینی مقادیر



شکل (۱۶): تاریخچه زمانی جابه‌جایی جانبی خاک در میدان آزاد در عمق‌های مختلف.

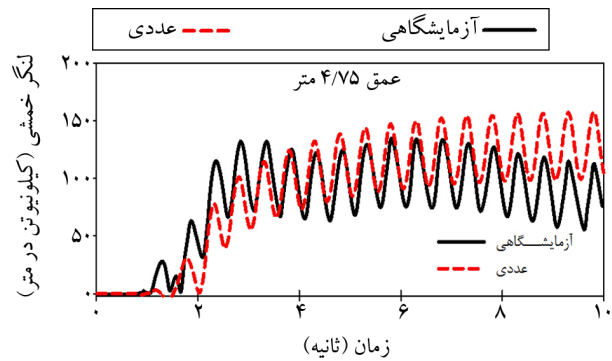


شکل (۱۷): تاریخچه زمانی جابه‌جایی جانبی سر شمع انعطاف‌پذیر.

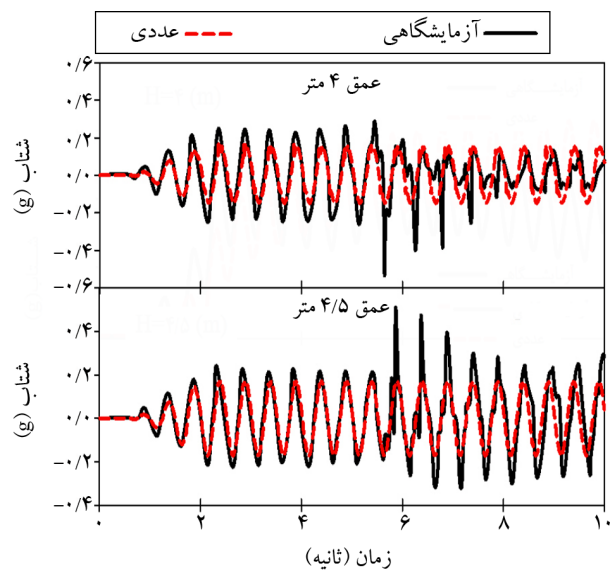
#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- تغییرات فشار آب حفره‌ای

در شکل (۱۸) تاریخچه زمانی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در گروه شمع‌های مختلف، در عمق ۶ متری از سطح زمین برای شیب‌های ۰، ۲، ۴ و ۶ درجه نشان داده شده است. طبق این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت: بیشینه اضافه فشار آب حفره‌ای در نزدیکی ۲ ثانیه که متناظر با زمان بیشینه شتاب زمین می‌باشد رخ می‌دهد و با افزایش شیب، زمان بیشینه اضافه فشار



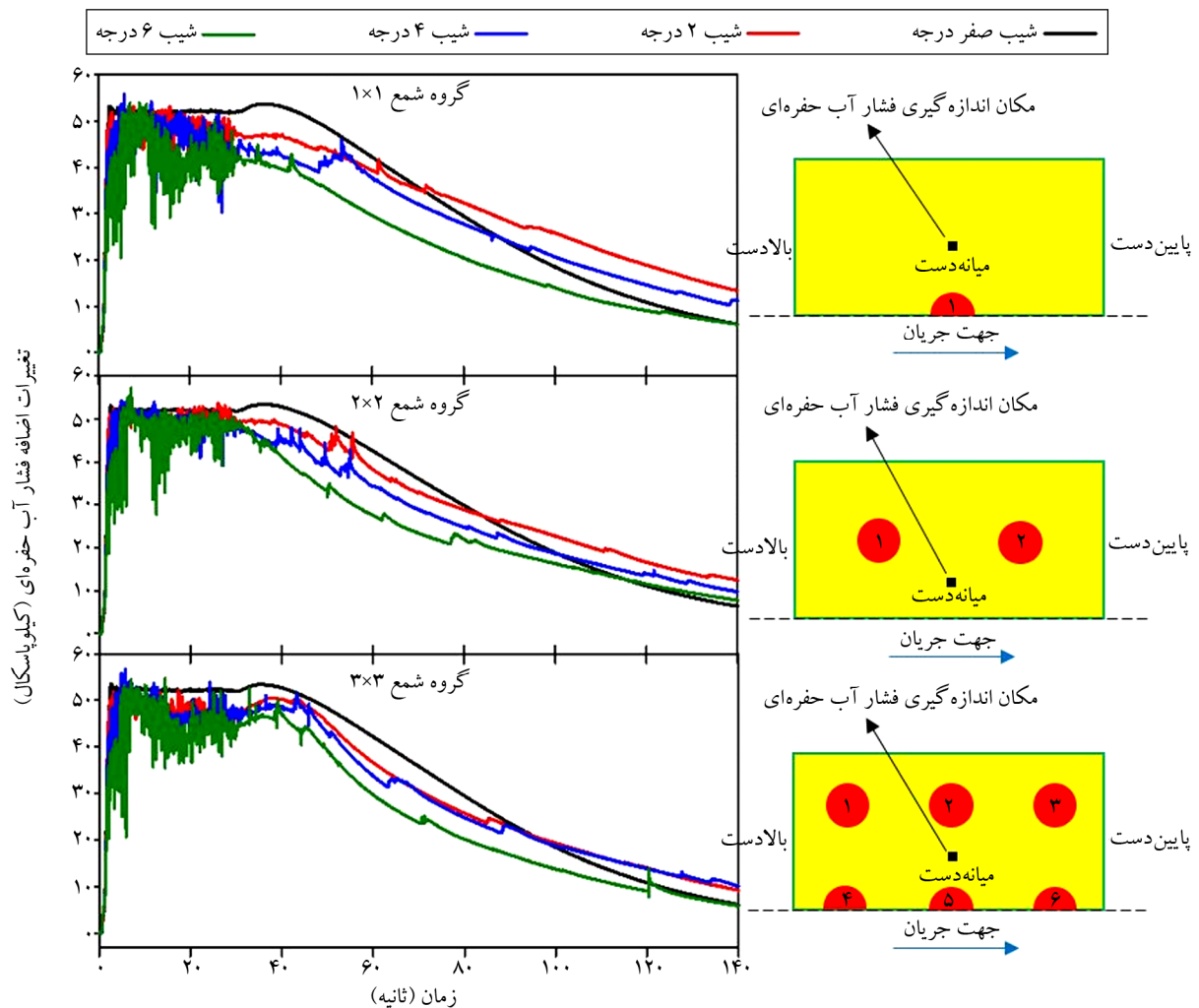
شکل (۱۴): تاریخچه زمانی تغییرات لنگر خمشی در شمع سخت در عمق ۴/۷۵ متری.



شکل (۱۵): تغییرات شتاب در میدان آزاد در عمق‌های مختلف (West array).

شکل‌های (۱۶) و شکل (۱۷) به ترتیب تاریخچه زمانی جابه‌جایی جانبی خاک در عمق‌های مختلف از میدان آزاد و جابه‌جایی جانبی سر شمع انعطاف‌پذیر که حاصل از مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مطلوب نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، اطمینان از روند خوب مدل‌سازی سه‌بعدی را ایجاد کرده است که این امر نشان می‌دهد تمامی عوامل مؤثر در نظر گرفته شده بر روی پاسخ لرزه‌ای خاک مانند تعیین مدل رفتاری و پارامترهای آن، تعیین ابعاد کلی و المان‌های مدل، شرایط مرزی در حد قابل قبولی مناسب است.

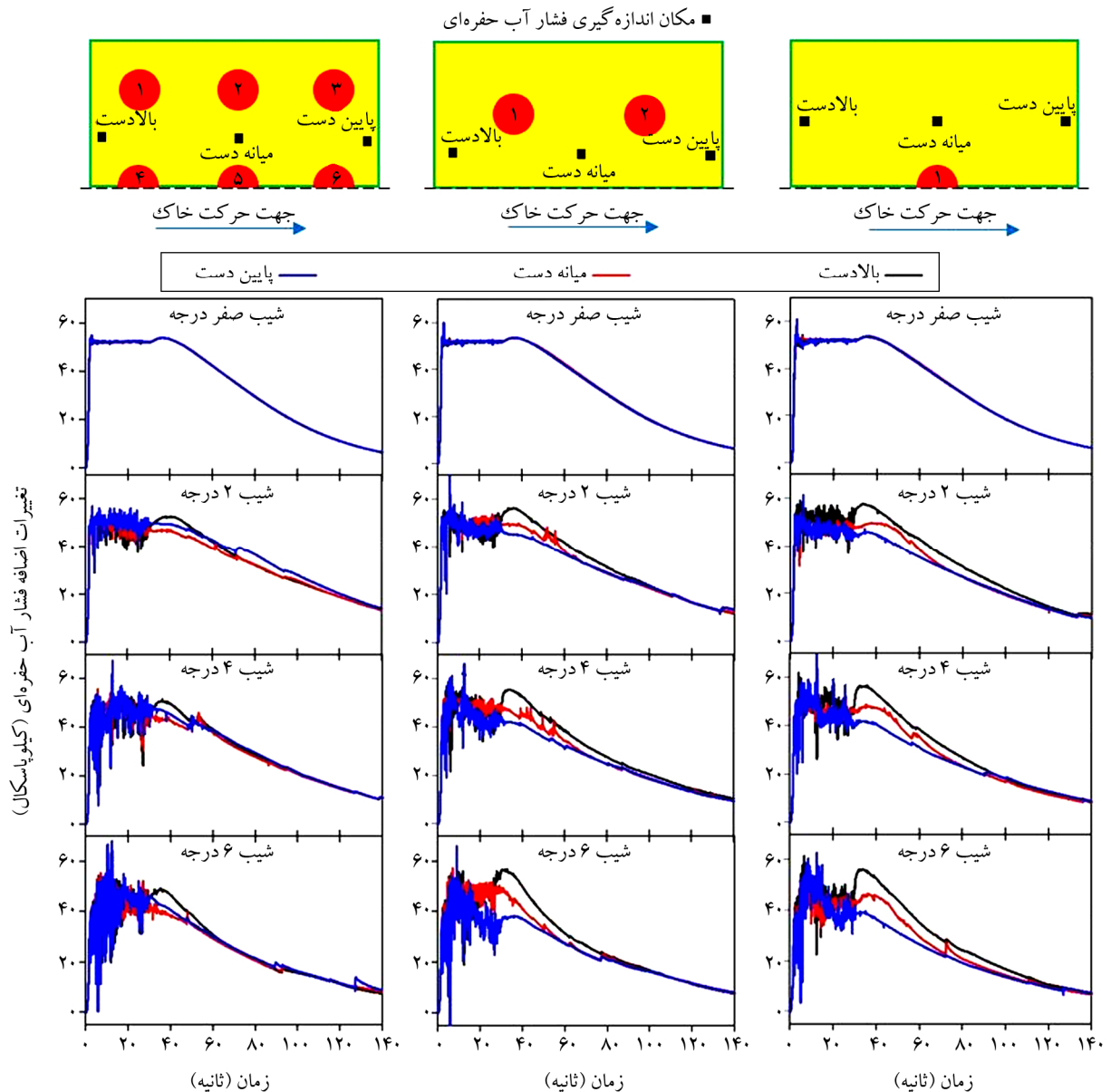


شکل (۱۸): تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۶ متری از سطح زمین به ازای شیب‌های مختلف در انواع گروه شمع‌ها.

شمع  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$  و  $3 \times 3$  به ازای شیب‌های مختلف زمین ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در زمین‌های شیب‌دار مقدار فشار آب حفره‌ای در پایین‌دست کمتر از بالادست است. همچنین مشاهده می‌شود که در بین شمع‌ها فشار آب حفره‌ای کمتری نسبت به بالادست گروه شمع ایجاد می‌شود که این موضوع باعث کاهش فشار جانبی وارده بر شمع‌های میانی از طرف خاک می‌شود. همچنین با توجه به شکل (۱۹) مشاهده می‌شود با افزایش شیب زمین، میزان تغییرات فشار آب حفره‌ای در پایین‌دست گروه افزایش می‌یابد که این رفتار را می‌توان ناشی از رفتار انقباضی خاک‌های سست دانه‌ای هست که متعاقباً باعث جابه‌جایی زیاد خاک پایین‌دست نسبت به خاک بالادست گروه شمع می‌شود.

آب حفره‌ای کمی به تأخیر می‌افتد. علت این اتفاق، افزایش رفتار اتساعی خاک است که با شیب افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده این شکل می‌توان دریافت که اضافه فشار آب حفره‌ای با افزایش شیب زمین، کاهش می‌یابد و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای زودتر آغاز می‌شود. در توجیه این امر می‌توان گفت که با افزایش شیب منجر به افزایش جابه‌جایی (افزایش جابه‌جایی ناشی از افزایش تنش برشی اولیه در توده خاک) می‌شود و به تناسب آن این عامل باعث افزایش رفتار اتساعی خاک می‌شود و در نتیجه فشار آب حفره‌ای کمتری در خاک به وجود می‌آید. در این مورد توضیحاتی در قسمت بعدی داده می‌شود.

در شکل (۱۹) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۶ متری از سطح زمین در بالادست، میانه و پایین‌دست گروه

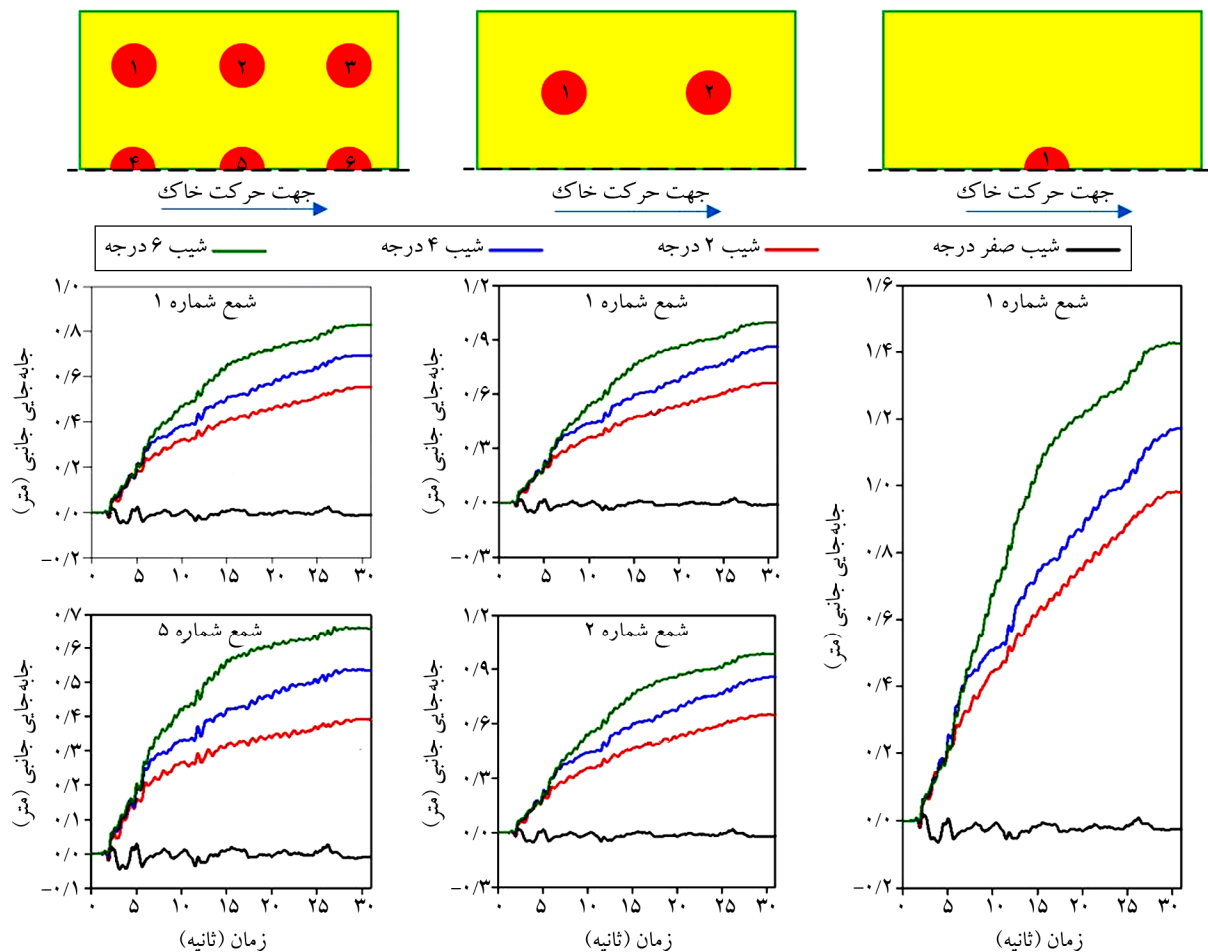


شکل (۱۹): تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۶ متری از سطح زمین در بالادست، میانه و پایین‌دست گروه شمع  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$  و  $3 \times 3$  به ازای شیب‌های مختلف زمین.

#### ۴-۲- تغییرات جانبی شمع و خاک

عدم وجود شیب، حداکثر جابه‌جایی جانبی سر شمع در نزدیکی ۲ ثانیه که متناظر با زمان بیشینه شتاب زمین می‌باشد، رخ می‌دهد، درحالی‌که در حالت وجود شیب به علت افزایش فشار جانبی وارده از طرف خاک، حداکثر تغییر شکل در انتهای بارگذاری رخ می‌دهد و باعث ایجاد جابه‌جایی ماندگار در شمع‌ها می‌شود. با مشاهده نمودار تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در زمین‌های شیب‌دار (شکل‌های ۱۸ و ۱۹) می‌توان نتیجه گرفت که در زمین‌های شیب‌دار به علت کاهش و زودتر زایل شدن اضافه فشار

شکل (۲۰) تاریخچه زمانی جابه‌جایی جانبی سر گروه شمع  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$  و  $3 \times 3$  را به ازای شیب‌های مختلف زمین نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲۰) در ثانیه‌های اول زلزله به دلیل عدم روانگرایی خاک، شیب زمین تأثیر کمی بر روی جابه‌جایی شمع‌ها دارد اما با وقوع روانگرایی و کاهش مقاومت برشی خاک مشاهده می‌شود که با افزایش شیب، جابه‌جایی شمع‌ها به شدت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در حالت

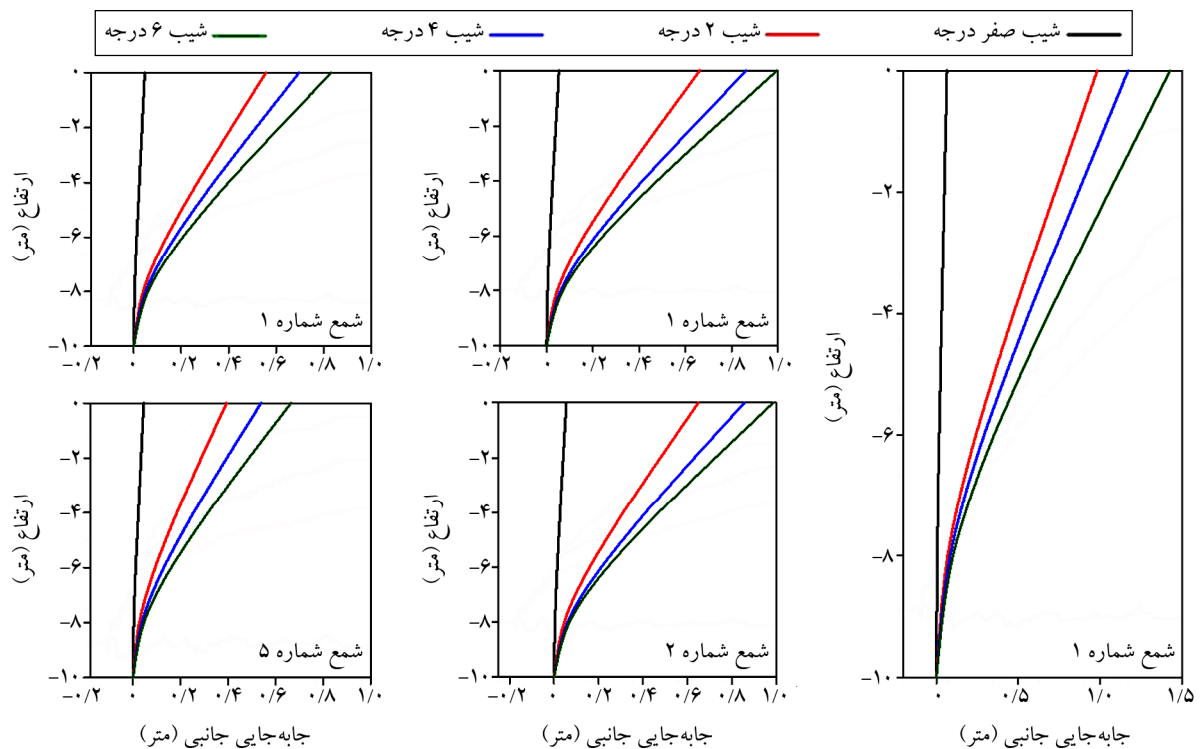

 شکل (۲۰): تاریخچه زمانی جابه‌جایی جانبی سرگروه شمع  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$  و  $3 \times 3$  در ازای شیب‌های مختلف زمین.

گروه شمع  $1 \times 1$  با افزایش شیب زمین از ۲ به ۶ درجه، جابه‌جایی جانبی سرشمع، به میزان ۴۵ درصد افزایش یافته است. همچنین با دقت در شکل (۲۱) ملاحظه می‌شود که به ازای شیب ۲، ۴ و ۶ درجه، جابه‌جایی جانبی سر شمع شماره ۵ در گروه شمع  $3 \times 3$ ، به ترتیب به میزان ۳۰، ۲۴ و ۲۰ درصد نسبت به شمع شماره ۱ کاهش یافته است.

علت این کاهش در جابه‌جایی جانبی شمع، مربوط به اثرات سایه و همسایگی در گروه شمع‌ها می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با توجه به محصورشدگی شمع شماره ۵ توسط شمع‌های بالادست و پایین‌دست، مقدار جابه‌جایی جانبی شمع شماره ۵ به شدت کاهش یافته است. این مطلب بیانگر این است که در صورت استفاده از شمع‌های قربانی شونده<sup>۸</sup> در بالادست و پایین‌دست گروه شمع اصلی، می‌توان اثرات روانگرایی و گسترش جانبی را بر روی گروه شمع اصلی کاهش داد.

آب حفره‌ای، انتظار می‌رود که جابه‌جایی خاک و شمع کاهش یابد در حالی که در شکل (۲۰) خلاف این موضوع نشان داده شده است. علت این تناقض را می‌توان ناشی از تأثیر تنش برشی استاتیکی در راستای شیب دانست، این تنش برشی ناشی از وزن توده خاک می‌باشد که باعث افزایش جابه‌جایی شمع و خاک در زمین‌های شیب‌دار می‌شود.

شکل (۲۱) بیشینه جابه‌جایی جانبی شمع‌های گروه شمع  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$  و  $3 \times 3$  را در ارتفاع، به ازای شیب‌های مختلف زمین نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در گروه شمع  $3 \times 3$  تنها بیشینه جابه‌جایی جانبی شمع شماره ۱ و ۵ (شمع شماره ۱ و ۵ به ترتیب بیرونی‌ترین و داخلی‌ترین شمع در گروه شمع  $3 \times 3$  می‌باشد) مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۲۱) قابل مشاهده است در همه‌ی آرایش گروه شمع‌ها، با افزایش شیب زمین، جابه‌جایی جانبی شمع‌ها افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در



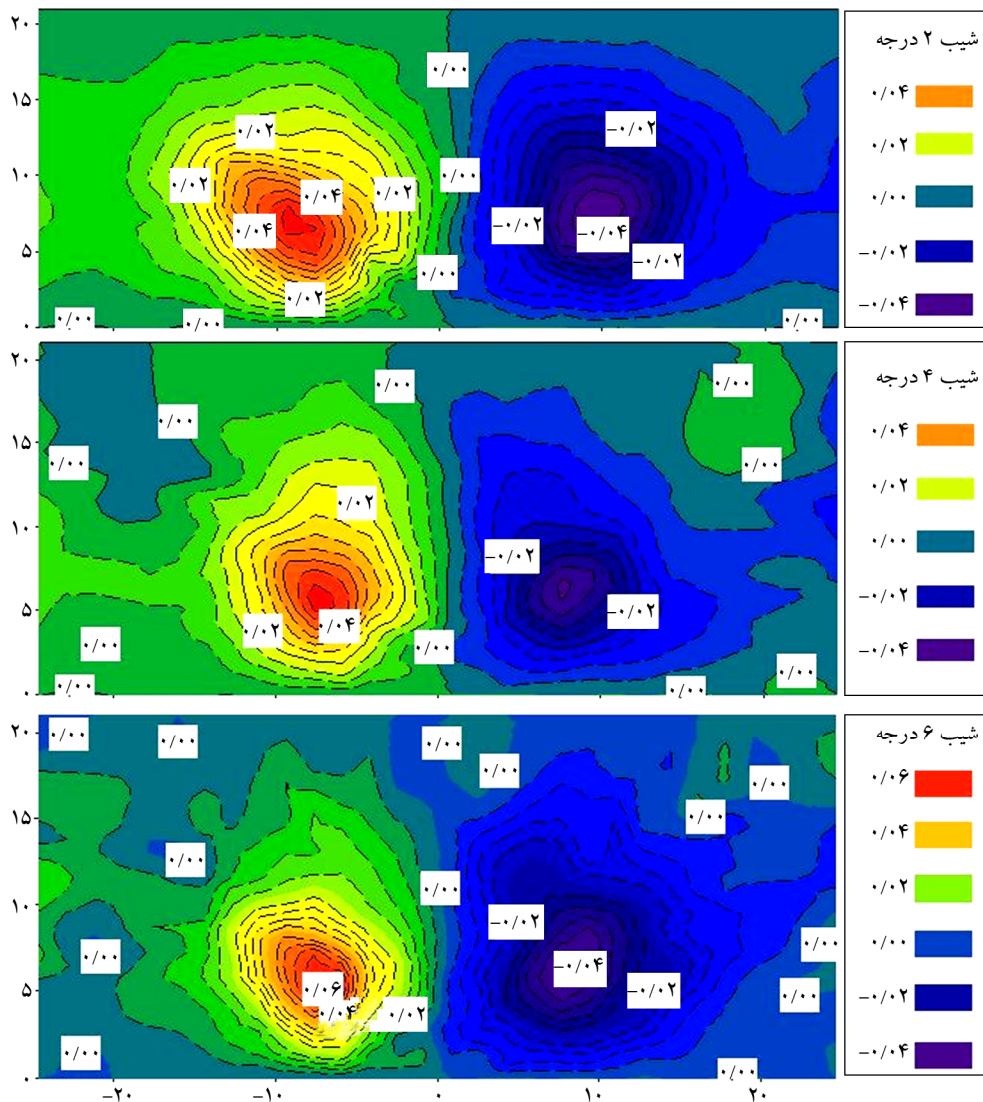
شکل (۲۱): پیشینه جابه‌جایی جانبی شمع‌های گروه شمع ۱×۱، ۲×۲ و ۳×۳ در ارتفاع، به ازای شیب‌های مختلف زمین.

در ۵ در گروه شمع ۳×۳ و شمع‌های ۱ و ۲ در گروه شمع ۲×۲ تحت شیب ۲ درجه در ارتفاع ۶ متری از سطح زمین نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در زمین‌های شیب‌دار، شمع‌های بالادست لنگر خمشی بیشتری نسبت به شمع‌های پایین دست و شمع‌های میانی متحمل می‌شوند. از طرفی هر چه میزان محصورشدگی یک شمع در گروه توسط شمع‌های بالادست و پایین دست بیشتر باشد مقدار لنگر و جابه‌جایی کمتری را تجربه خواهد کرد. به طور مثال در گروه شمع ۳×۳، شمع شماره ۱ (شمع بالادست گروه) لنگر خمشی بیشتری نسبت به شماره ۳ (شمع پایین دست گروه) و شمع شماره ۵ (شمع میانی) متحمل می‌باشد. این مسئله بدلیل قرارگیری شمع شماره ۱ در گوشه‌ی بالادست مدل و اعمال نیروی جانبی زیاد از طرف خاک به شمع‌های بالادست در حین پدیده گسترش جانبی می‌باشد. همچنین شمع شماره ۵ به دلیل قرارگیری در ردیف میانی و محصورشدگی توسط شمع‌های بالادست و پایین دست گروه، لنگر خمشی کمتری را نسبت به شمع‌های دیگر تجربه کرده است.

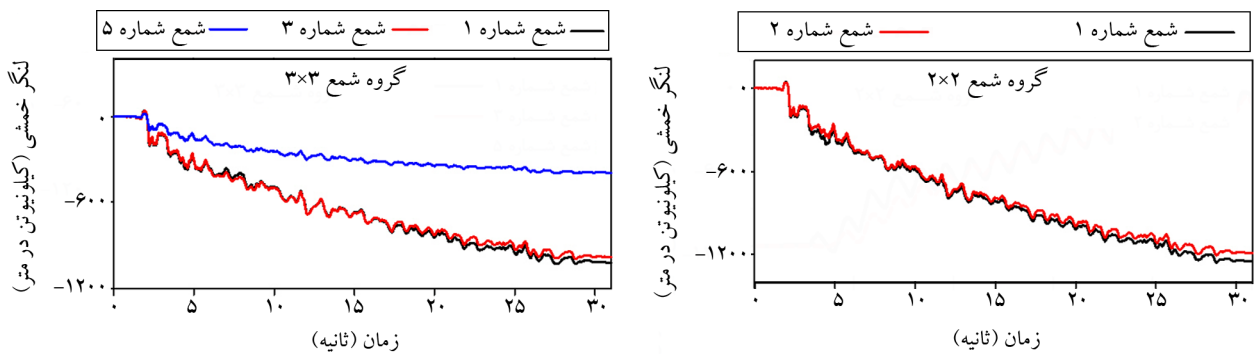
در شکل (۲۲) تغییر شکل قائم‌المان‌های خاک در ۱۰ ثانیه بعد از شروع بارگذاری برای گروه شمع ۳×۳ به ازای شیب‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمین‌های شیب‌دار با شروع تغییر شکل‌های جانبی، بالازدگی خاک در قسمت بالادست و نشست خاک در قسمت پایین دست شمع رخ می‌دهد. درحالی‌که در زمین‌های مسطح چنین روندی مشاهده نمی‌شود، دلیل این امر را می‌توان ناشی از حرکت توده خاک در زمین‌های شیب‌دار به سمت پایین دست دانست که این موضوع باعث به وجود آمدن تنش‌های فشاری و کششی به ترتیب در بالادست و پایین دست شمع می‌شود. ایجاد تنش‌های کششی در پایین دست باعث افزایش رفتار اتساعی در خاک می‌شود و متعاقباً موجب زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای می‌گردد. با افزایش شیب، ناحیه تحت تأثیر در بالادست و پایین دست گروه شمع افزایش می‌یابد و همچنین مقدار نشست و بالازدگی خاک نیز افزایش می‌یابد.

#### ۴-۳- لنگر خمشی در شمع‌ها

در شکل (۲۳) تاریخچه زمانی لنگر خمشی شمع‌های ۱، ۳،



شکل (۲۲): تغییر شکل قائم المان‌های خاک، ۱۰ ثانیه بعد از شروع بارگذاری برای گروه شمع ۳×۳ به ازای شیب‌های مختلف زمین.



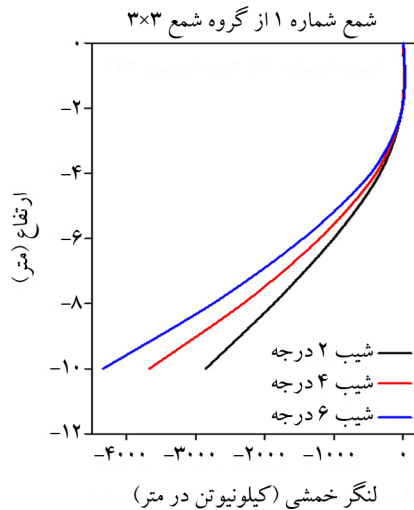
شکل (۲۳): تاریخچه زمانی لنگر خمشی شمعی‌های گروه شمع ۳×۳ و گروه شمع ۲×۲ تحت شیب ۲ درجه در ارتفاع ۶ متری از سطح زمین.

ملاحظه می‌گردد، رفتار طره‌ای شمعی سبب شده است که حداکثر لنگر خمشی در نوک شمعی به وجود آید، به طوری که لنگر خمشی شمعی از سر آن به سمت نوک شمعی به تدریج افزایش یابد. همچنین

شکل (۲۴) بیشینه لنگر خمشی شمعی‌های ۱، ۳ و ۵ در گروه شمعی ۳×۳ و شمعی‌های ۱ و ۲ در گروه شمعی ۲×۲ را در ارتفاع ۶ متری تحت شیب ۲ درجه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۲۴)

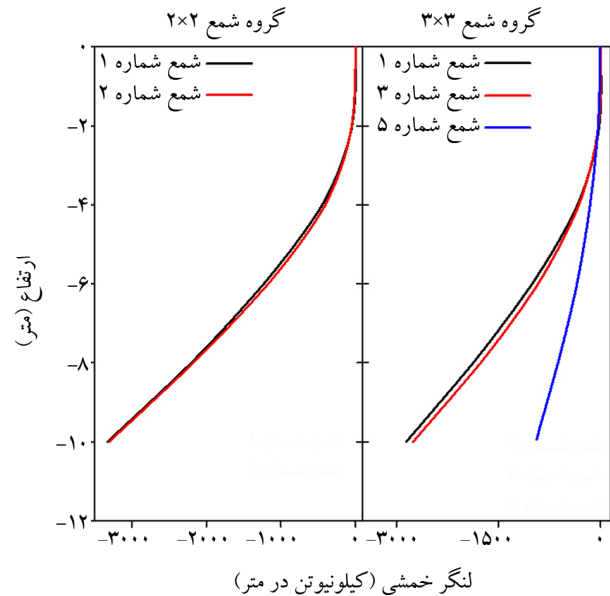


روندی مشابه با تحریک ورودی دارد و هرچه به سطح زمین نزدیک می‌شویم مقدار شتاب از یک طرف کاهش و از سوی دیگر افزایش می‌یابد و نمودار آن شکل نامتقارن به خود می‌گیرد.

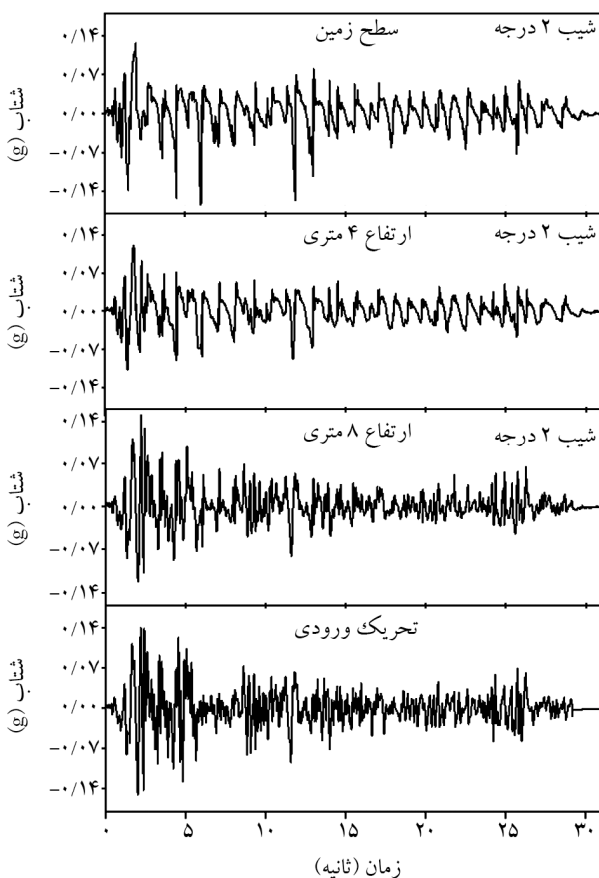


شکل (۲۵): پیشینه لنگر خمشی شمع شماره ۱ از گروه شمع ۳×۳ در ارتفاع به ازای شیب‌های مختلف زمین.

در هر دو گروه شمع مشاهده گردید که شمع‌های بالادست نسبت به شمع‌های پایین دست به دلیل وقوع پدیده گسترش جانبی، لنگر خمشی بیشتری را در ارتفاع تجربه کرده‌اند.



شکل (۲۴): تاریخچه زمانی لنگر خمشی شمع‌های گروه شمع ۳×۳ و گروه شمع ۲×۲ تحت شیب ۲ درجه در ارتفاع ۶ متری از سطح زمین.



شکل (۲۶): تغییرات شتاب در میدان آزاد به ازای شیب ۲ درجه در عمق‌های مختلف از لایه خاک.

شکل (۲۵) پیشینه لنگر خمشی را در طول شمع شماره ۱ از گروه شمع ۳×۳ به ازای شیب‌های ۲، ۴ و ۶ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش شیب زمین، لنگر خمشی وارده به شمع‌ها افزایش می‌یابد که دلیل این امر، افزایش جابه‌جایی و به دنبال آن تغییر شکل بیشتر شمع می‌باشد. به طور مثال با تغییر شیب زمین از ۲ به ۴ درجه و از ۲ به ۶ درجه، لنگر خمشی در نوک شمع شماره ۱ از گروه شمع ۳×۳ به ترتیب ۲۲ و ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین در طراحی گروه شمع‌ها تحت بار جانبی لرزه‌ای، شمع‌های کناری به ویژه شمع‌های کناری بالادست اهمیت بیشتری دارند و بحرانی‌ترند.

#### ۴-۴- تغییرات شتاب خاک

شکل (۲۶) تغییرات شتاب در میدان آزاد را به ازای شیب ۲ درجه در عمق‌های مختلف از لایه خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در لایه‌های زیرین تغییرات شتاب

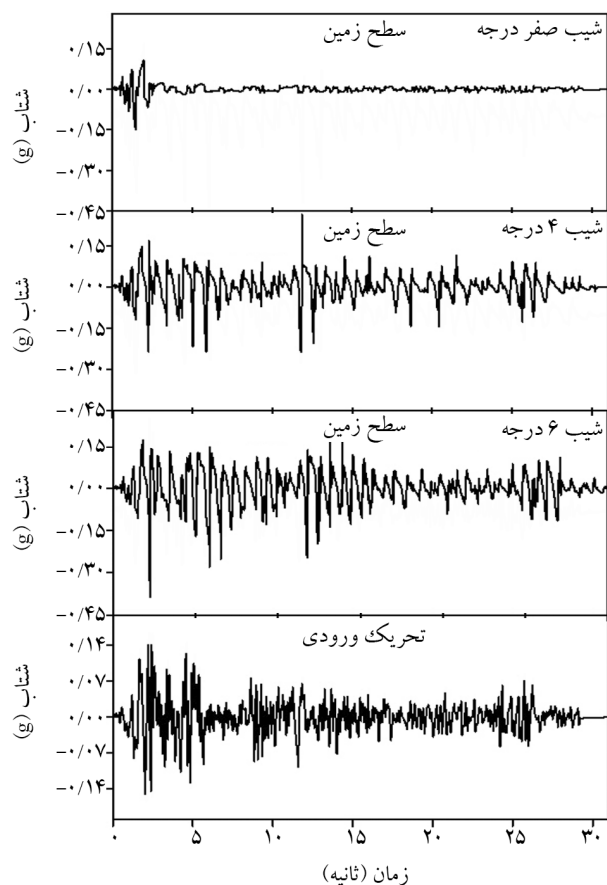
دارای پرش‌های بزرگی است که می‌تواند به دلیل وقوع بزرگنمایی و یا اتساع موضعی خاک به همراه کاهش ناگهانی در فشار آب حفره‌ای باشد.

### ۵- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی اثر شیب زمین بر رفتار گروه شمع‌ها می‌پردازد. مهم‌ترین نتایجی که از این مطالعه به دست آمده است به طور خلاصه عبارتند از:

- بر اساس نتایج در یک موقعیت مشخص از خاک، با افزایش شیب زمین، فشار آب حفره‌ای کمتری تولید شده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای زودتر آغاز می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش شیب زمین، تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد.
- در زمین‌های شیب‌دار مقدار فشار آب حفره‌ای در پایین دست کمتر از بالادست می‌باشد و همچنین با افزایش شیب زمین، میزان تغییرات فشار آب حفره‌ای در پایین دست گروه شمع افزایش می‌یابد که این رفتار را می‌توان ناشی از جابه‌جایی زیاد خاک پایین دست نسبت به خاک بالادست گروه شمع دانست که باعث اعمال تنش‌های کششی به خاک می‌شود.
- در زمین‌های شیب‌دار با وجود کاهش فشار آب حفره‌ای، جابه‌جایی جانبی شمع و خاک به شدت افزایش می‌یابد. علت این تناقض را می‌توان ناشی از تأثیر تنش برشی استاتیکی در راستای شیب دانست. این تنش برشی ناشی از وزن توده خاک می‌باشد که باعث افزایش جابه‌جایی شمع و خاک در زمین‌های شیب‌دار می‌شود.
- تنش برشی ناشی از وزن توده خاک و رفتار اتساعی خاک، دو عامل مهم می‌باشند که روند تغییرات جابه‌جایی را کنترل می‌کند، عامل اول اثر افزایشی و عامل دوم اثر کاهش بر روی روند جابه‌جایی دارد.
- در زمین‌های شیب‌دار تنش‌های برشی ناشی از وزن توده خاک از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی جابه‌جایی و نیروهای وارده به شمع‌ها می‌باشد.

شکل (۲۷) تغییرات شتاب روی سطح زمین از میدان آزاد را به ازای شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش شیب زمین و شروع تغییر شکل‌های جانبی، شتاب در جهت خلاف شیب تقویت شده و این امر باعث عدم تقارن در نمودار شتاب افقی می‌شود که این رفتار ناشی از افزایش رفتار اتساعی خاک در زمین‌های شیب‌دار می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (۲۷) در زمین‌های مسطح، شتاب روی سطح زمین با شتاب تحریک ورودی کاملاً متفاوت است. در واقع به دلیل وقوع روانگرایی کامل در زمان متناظر با بیشینه شتاب افقی، از آن به بعد خاک تحمل شتاب‌های زیاد را نداشته، در نتیجه شتاب قابل تحمل در لایه‌ی خاک روانگرا به مراتب کمتر از شتاب تحریک ورودی می‌باشد. همچنین از لحظه‌ی صفر تا زمان متناظر با بیشینه شتاب افقی، شتاب روی سطح زمین نسبت به تحریک ورودی تغییرات اندکی داشته و در برخی از موارد



شکل (۲۷): تغییرات شتاب روی سطح زمین از میدان آزاد به ازای شیب‌های مختلف زمین.

- liquefaction using centrifuge model tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **17**(11), 5929-5961.
3. Su, L., Wan, H.P., Abtahi, Sh., Li, Y., and Ling, X.Z. (2020) Dynamic response of soil-pile-structure system subjected to lateral spreading: shaking table test and parallel finite element simulation. *Canadian Geotechnical Journal*, **57**(4), 497-517.
  4. He, L., Elgamal, A., Abdoun, T., Abe, A., Dobry, R., Hamada, M., Menses, J., Sato, M., Shantz T., and Tokimatsu, K. (2009) Liquefaction-induced lateral load on pile in a medium Dr Sand layer. *Journal of Earthquake Engineering*, **13**(7), 916-938.
  5. He, L., Ramirez, J., Lu, J., Tang, L., Elgamal, A.E., and Tokimatsu, K. (2017) Lateral spreading near deep foundations and influence of soil permeability. *Canadian Geotechnical Journal*, **54**(6), 846-861.
  6. Dobry, R., Thevanayagam, S., Medina, C., Bethapudi, R., Elgamal, A., Bennett, V., Abdoun, T., Zeghal, M., El Shamy, U., and Mercado, V.M. (2011) Mechanics of lateral spreading observed in a full-scale shake test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(2), 115-129.
  7. Kavand, A., Haeri, S.M., Asefzadeh, A., Rahmani, I., Ghalandarzadeh, A., and Bakhshi, A. (2014) Study of the behavior of pile groups during lateral spreading in medium dense sands by large scale shake table test. *International Journal of Civil Engineering*, **12**(3), 186-203.
  8. Motamed, R., Sesov, V., Towhata, I., and Tuan Anh, N. (2010) Experimental modeling of large pile groups in sloping ground subjected to liquefaction-induced lateral flow: 1-G shaking table tests. *Soils and Foundations*, **50**(2), 261-279.
  9. Motamed, R., Towhata, I., Honda, T., Tabata, K., and Abe, A. (2013) Pile group response to liquefaction-induced lateral spreading: E-Defense large shake table test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **51**, 35-46.
  10. Haeri, S.M., Kavand, A., Rahmani, I., and Torabi, H. (2012) Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **38**, 25-45.
- ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای به تنهایی ملاک مناسبی برای ارزیابی ضریب اطمینان در برابر روانگرایی نمی‌باشد، به عنوان مثال در حالتی که شیب زمین از ۲ به ۴ درجه افزایش یابد، ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای کاهش می‌یابد در حالی که جابه‌جایی و لنگرها در شمع به شدت افزایش می‌یابد.
- بر اساس نتایج در زمین‌های شیب‌دار با شروع تغییر شکل‌های جانبی، بالازدگی خاک در قسمت بالادست و نشست خاک در قسمت پایین دست شمع رخ می‌دهد درحالی‌که در زمین‌های مسطح چنین روندی مشاهده نمی‌شود، دلیل این امر را می‌توان ناشی از حرکت توده خاک در زمین‌های شیب‌دار به سمت پایین دست دانست.
- در زمین‌های شیب‌دار، شمع‌های بالادست لنگر خمشی بیشتری نسبت به شمع‌های پایین دست و شمع‌های میانی متحمل می‌شوند. از طرفی هر چه میزان محصورشدگی یک شمع در گروه توسط شمع‌های بالادست و پایین دست بیشتر باشد مقدار لنگر کمتری را تجربه خواهد کرد.
- در زمین‌های مسطح بدون شمع (حالت میدان آزاد) شتاب‌های منتقل شده به سطح زمین کاهش می‌یابد، درحالی‌که در زمین‌های شیب‌دار روانگرایی باعث افزایش شتاب در جهت خلاف شیب می‌شود.

## قدردانی

در این مقاله از مرکز پردازش محاسبات سریع دانشگاه مازندران به منظور ارائه خدمات پردازش سریع جهت آنالیز مدل‌های عددی تشکر و قدرانی می‌شود.

## مراجع

1. Chaloulos, Y.K., Bouckovalas, G.D., and Karamitros, D.K. (2013) Pile response in submerged lateral spreads: common pitfalls of numerical and physical modeling techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **55**, 275-287.
2. Fallahzadeh, M., Haddad, A., and Jafarian, Y. (2019) Seismic performance of end-bearing piled raft with countermeasure strategy against

- Research (PEER) Center*, **264**.
21. Mroz, Z. (1967) On the description of anisotropic workhardening. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **15**(3), 163-175.
  22. Elgamal, A., Yang, Z., and Parra, E. (2002) Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(4), 259-271.
  23. Biot, M.A. (1962) Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*, **33**(4), 1482-1498.
  24. Chan, A., H.-C. (1988) *A Unified Finite Element Solution to Static and Dynamic Problems of Geomechanics*. Swansea University.
  25. Zienkiewicz, O., Chan, A., Pastor, M., Paul, D., and Shiomi, T. (1990) Static and dynamic behaviour of soils: a rational approach to quantitative solutions. I. Fully saturated problems. Proceedings of the Royal Society of London. *A Mathematical and Physical Sciences*, **429**(1877), 285-309.
  26. Yang, Z., Elgamal, A., Adalier, K., and Sharp, M.K. (2004) Earth dam on liquefiable foundation and remediation: numerical simulation of centrifuge experiments. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(10), 1168-1176.
  27. Yang, Z., Lu, J., and Elgamal, A. (2008) *OpenSees Soil Models and Solid-Fluid Fully Coupled Elements User's Manual*.
  28. Klar, A., Frydman, S., and Baker, R. (2004) Seismic analysis of infinite pile groups in liquefiable soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(8), 565-575.
  29. Law, H.K. and Lam, I.P. (2001) Application of periodic boundary for large pile group. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(10), 889-892.
  11. Abdoun, T. Dobry, R. O'Rourke, T.D., and Goh, S.H. (2003) Pile response to lateral spreads: centrifuge modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**(10), 869-878.
  12. Gonzalez, M.A. (2008) *Centrifuge Modeling of Pile Foundation Response to Liquefaction and Lateral Spreading: Study of Sand Permeability and Compressibility Effects Using Scaled Sand Technique*. Rensselaer Polytechnic Institute.
  13. Toyota, H., Towhata, I., Imamura, S.-I., and Kudo, K.-I. (2004) Shaking table tests on flow dynamics in liquefied slope. *Soils and Foundations*, **44**(5), 67-84.
  14. Ghasemi-Fare, O. and A. Pak, (2016) Numerical investigation of the effects of geometric and seismic parameters on liquefaction-induced lateral spreading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **89**, 233-247.
  15. Asgari, A., M. Oliaei, and M. Bagheri, (2013) Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **51**, 77-96.
  16. Asgari, A., Ranjbar, F., and Akbarzadeh Bengar, H. (2020) Using pile group to mitigate lateral spreading in uniform and stratified liquefiable sand strata: three dimensional numerical simulation. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Accepted (in Persian).
  17. Elgamal, A., Lu, J., and Forcellini, D. (2009) Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(11), 1672-1682.
  18. Huang, D., Wang, G., and Jin, F. (2020) Effectiveness of pile reinforcement in liquefied ground. *Journal of Earthquake Engineering*, **24**(8), 1222-1244.
  19. Jeremic, B. (2001) *Development of geotechnical capabilities in OpenSees*. Citeseer.
  20. Mazzoni, S., et al. (2006) OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering*

#### واژه نامه

Infinite Pile Group	۱- گروه شمع نامحدود
Periodic Boundary	۲- مرز تکرار شونده
Pressure Dependent Multi Yield	۳- مدل رفتاری چند سطح تسلیمی وابسته به فشار

- |                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| Kinematic Hardening         | ۴- سخت‌شوندگی جنبشی     |
| Soil Contractive Behavior   | ۵- رفتار انقباضی خاک    |
| Bearing Pile                | ۶- مقاومت اتکایی        |
| Variable Transient Analysis | ۷- تحلیل گذرای متغیر    |
| Sacrifice Pile              | ۸- شمع‌های قربانی شونده |

## Effect of Ground Slope on the Dynamic Response of Piles Group in Liquefiable Soil based on 3D Numerical Simulation

Faramarz Ranjbar<sup>1</sup>, Ali Asgari<sup>2\*</sup> and Habib Akbarzadeh Bengar<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Technology and Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran,  
\*Corresponding Author, email: a.asgari@umz.ac.ir
3. Associate Professor, Faculty of Technology and Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

### 1. Introduction

During the past earthquakes, liquefaction and the resulting deformations have caused significant damage to the deep foundations of bridges, ports, offshore structures and buildings that these damages have been more severe in mildly sloping grounds due to lateral spreading-induced liquefaction. Lateral spreading-induced soil liquefaction, has imposed significant damage to the deep foundations of bridges, ports, offshore structures and buildings. The behavior of piles in liquefied soil has been investigated by various researchers using field observations, large-scale (1-g) shake table tests, centrifuge tests as well as numerical simulations. Despite various experimental, numerical and field studies by previous researchers, there is also no comprehensive approach to assessing the effects of lateral spreading on pile groups. On the other hand, numerical simulations are an economical tool for investigating and a means of representing the seismic performance of the pile groups at sites with liquefaction-induced lateral spreading.

The main purpose of this study is to evaluate the effect of various pile groups (e.g., 1×1, 2×2 and 3×3) on reducing the potential for liquefaction during earthquake are investigated parametrically, applying three-dimensional finite element (FE) simulations using OpenSees software. To examine the ground inclination angle and array of pile groups' effects, different models have been subjected to the El Centro earthquake (1940). This study evaluates the effect of each of these factors on soil acceleration, lateral displacement, excess pore pressure and piles bending moment. The numerical model has been verified and calibrated in the literature through analysis of a well-documented large-scale (1-g) shake-table test.

### 2. Numerical Simulations

To gain insight into the effect of ground inclination angle on various pile groups in 10-m-thick mildly inclined liquefiable soil above the bedrock (Figure 5). The physical and mechanical properties of the soil layers and the pile respectively, are presented in Tables (1) and (2). Also, all the models in this study have been subjected to the El Centro earthquake (1940) (shown in Figure 9) with 0.15 g scaled peak ground acceleration.

### 3. Results and discussions

To investigate the effect of the ground inclination angle on the generation and dissipation of pore water pressure, the time history of excess pore water pressure for various pile groups in depths of 6 m is shown in Figure (18). According to Figure (18), as the ground inclination angle increases, the excess pore water pressure disappears sooner, which is due to the increasing effect of the dilatancy phenomenon.

Figure (20) shows time history of the pile head lateral displacement for different ground of the slopes ( $\alpha_f = 0^\circ$  to  $6^\circ$ ) in the pile group 1×1- 2×2 - 3×3. According to Figure (20) in the initial seconds of the excitation due to the lack of soil liquefaction, the ground of the slope has a little effect on the lateral displacement of the piles but with the occurrence of liquefaction and reduction of soil shear strength, it is observed that with increasing slope, the lateral displacement of piles increases severely. It is also observed that in the horizontal model, the maximum lateral

displacement of the pile head occurs in about 2 seconds, which corresponds to the maximum acceleration time of the El Centro earthquake. While in mildly sloping ground due to the increase of lateral pressure from the soil, the maximum deformation occurs at the end of the earthquake and causes permanent displacement in the piles.

#### 4. Conclusions

The main important conclusions drawn from present study are as follows:

1. Based on the results, with increasing the ground slope angle in a specified point of the soil, less pore water pressure is produced and the dissipation of pore water pressure starts earlier, but the variations of pore water pressure increased.
2. In mildly sloping ground, the amount of pore water pressure in downslope is less than upslope ground and also with increasing ground slope angle, the rate fluctuations of excess pore water pressure increased in the downslope of the pile group. This behavior is due to the high displacement downslope soil relative to upslope soil in the pile group.
3. In mildly sloping ground, despite the reduction of pore water pressure, lateral displacement of piles and soil severely increased. The reason for this contradiction due to the direction of static shear stress is parallel to the direction of soil slope. This shear stress is due to the weight of the soil mass, which increases the displacement of piles and soil in mildly sloping ground.

At the last, it should be noted that, the ground slope angle is a very effective parameter in the lateral and vertical displacement of piles that should be considered in design code.

**Keywords:** Ground Slope Angle, Lateral Spreading, Pile Groups, Three-Dimensional Finite Element (FE) Simulations, Liquefaction, OpenSees.