

مدل سازی عددی - فیزیکی اثر جهت بارگذاری زلزله بر اندرکنش لرزه‌ای شیب - ردیف شمع شناور

حسن شرفی*^۱ و یزدان شمس ملکی^۲

^۱ استادیار دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
^۲ دانشجوی دوره دکتری ژئوتکنیک گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(دریافت: ۹۶/۹/۲۸، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۴)

چکیده

در این تحقیق، عملکرد ردیفی از شمع‌های شناور، برای پایدارسازی لرزه‌ای شیب‌های ماسه‌ای خشک، تحت بارگذاری دینامیکی در جهات مختلف، مورد مطالعه قرار گرفته است. استفاده از ردیف شمع، یکی از متداول‌ترین روش‌های پایدارسازی شیب‌های خاکی است و شناخت رفتار لرزه‌ای این مسأله، تحت اثر بارگذاری‌های لرزه‌ای واقعی چندمحوری، ضرورتی ویژه دارد. در این مقاله، مطالعه رفتار لرزه‌ای ردیف شمع‌های شناور مسلح کننده شیب، به کمک اجرای هم‌زمان مدل‌سازی‌های عددی تفاضل محدود سه‌بعدی و مدل‌سازی‌های فیزیکی صورت گرفته است. از مدل‌سازی‌های پارامتری عددی، برای بررسی اثر جهات اعمال زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، بر پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های ردیف شمع - شیب استفاده شده است. بارگذاری زلزله در مدل‌های عددی بزرگ - مقیاس، به صورت اعمال حرکات لرزه‌ای در جهات داخل و خارج از صفحه مدل‌سازی، در راستاهای طولی، عرضی، قائم و ترکیب این حالات، بوده است. همچنین مدل‌سازی فیزیکی مسأله، به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، با اعمال بارگذاری‌های هارمونیک سینوسی، در راستاهای طولی و عرضی مدل کوچک - مقیاس، به کمک میز لرزه اجرا شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تحت اثر بارگذاری‌های لرزه‌ای در جهات دو و سه محوری، نصب ردیف شمع‌های شناور، می‌تواند تا حدود ۵۰٪ مقادیر تغییر شکل‌های جانبی شیب‌های مسلح نشده را کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: شمع، شیب ماسه‌ای خشک، بارگذاری لرزه‌ای، مدل عددی، مدل فیزیکی.

۱- مقدمه

بروز اتکای گوه لغزنده خاک به شمع و بروز پدیده قوس‌زدگی، در خاک ماسه‌ای فراهم گردد.

مطابق مطالعات Ellis و همکاران (۲۰۱۰)، کاربرد ردیف شمع با فواصل بزرگتر از ۵ برابر قطر شمع، عملاً تأثیری در پایدارسازی شیب ندارد، در واقع در این حالت، شمع‌های ردیف شمع به صورت "شمع تکی" عمل می‌کنند و بهینه‌ترین فاصله نیز معادل فاصله‌ای کوچکتر از ۴ برابر قطر شمع‌ها معادل حدود ۳/۵ برابر قطر شمع است. پدیده قوس‌زدگی، اثر مثبتی در افزایش پایداری شیب مسلح شده با ردیف شمع دارد، به طوری که در شرایط عدم رخداد قوس‌زدگی پدیده مخرب جریان مصالح اتفاق می‌افتد (Ellis و همکاران، ۲۰۱۰).

مطالعه مسأله پایداری لرزه‌ای شیب‌های مسلح شده با ردیف شمع شناور، به کمک روش‌های مشخصی صورت گرفته است. برای مثال، می‌توان از روش‌های تحلیل حدی (کران بالا یا کران پایین، عموماً کران بالا و به کمک نظریه تحلیل حدی سینماتیک) به همراه روش اعمال بار لرزه‌ای شبه - استاتیکی (Matsui و Ito، ۱۹۷۵؛ Ausilio و همکاران،

بررسی موضوع استفاده از شمع‌ها، به عنوان عناصر مسلح کننده شیب‌های خاکی، به ویژه شیب‌های ماسه‌ای، در سال‌های اخیر به دفعات مورد تحقیق قرار گرفته است. شمع‌های مسلح کننده شیب، در حالت کلی می‌توانند در سه چارچوب انتقال بار اتکایی، شناور و با اتکای جزئی، مورد استفاده قرار بگیرند. در حالت اتکایی، یک بستر سخت تحتانی، با اختلاف سختی مشخص، نسبت به لایه‌های ناپایدار فوقانی، در زیر لایه ناپایدار لغزنده شیب قرار دارد، به طوری که طولی از شمع درون آن فرو رفته و ثابت می‌گردد. به طور کلی، رفتار باربری شمع‌های شناور (اصطلاحاً) و اتکایی، در خاک ماسه‌ای کاملاً متفاوت است (شوش‌پاشا و شرف‌خواه، ۱۳۹۲؛ شوش‌پاشا و سعیدی، ۱۳۹۵).

اما در مورد مسأله شمع‌های شناور، تمامی طول شمع در لایه‌ای به مشخصه‌های سختی نسبتاً ثابت، قرار گرفته است، به طوری که عملاً انتهای شمع در لایه‌ای سخت‌تر، گیردار نشده است. فواصل مرکز به مرکز بین شمع‌ها در یک ردیف شمع، بایستی طوری باشد که امکان

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸۱۳۲۱۲۹۲

۲- مروری بر روش‌شناسی مطالعه حاضر (معرفی مدل عددی بزرگ-مقیاس)

در این مطالعه رفتار لرزه‌ای ردیف شمع‌های شناور، با سطح مقطع دایروی شکل، در دو مقیاس نمونه اصلی (پروتوتایپ) و مدل فیزیکی کوچک-مقیاس (ریز-مقیاس) مورد مطالعه قرار گرفته است. در این قسمت از مقاله، برخی مشخصات اصلی و فرضیات اولیه مدل بزرگ-مقیاس عددی ارائه می‌گردد. جزئیات بیشتر مدل‌های عددی بزرگ-مقیاس و نتایج حاصل از اجرای آن‌ها، پس از ارائه نتایج مدل‌های فیزیکی کوچک-مقیاس (بعد از بخش (۳) مقاله) ارائه می‌شود. در مقیاس نمونه اصلی (مدل عددی بزرگ-مقیاس)، شمع‌های بتن مسلح با مقطع دایروی و به قطر یک متر و طول ۱۰ متر، درست در وسط شیبی ۳۰ درجه، به ارتفاع ۱۲ متر، متشکل از مصالح ماسه‌ای خشک و ریز، نصب شده‌اند (شکل (۱)). فاصله مرکز به مرکز این شمع‌ها، جهت امکان ایجاد پدیده قوس‌زدگی (Arching) معادل ۲/۵ برابر قطر شمع‌ها، فرض شده است. فاصله مرکز به مرکز مورد جستجوی این تحقیق، طبق رابطه (۱) انتخاب شده است (Ellis و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\left(\frac{S}{B}\right)_{crit} \leq \frac{K_p^2}{K_p - K_a} \quad (1)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \phi/2) \quad (2)$$

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (3)$$

که در این رابطه S فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها، B پهنا، عرض یا قطر شمع‌ها و K_p و K_a به ترتیب ضریب فشار خاک مقاوم و محرک رانکین هستند، که بر حسب زاویه اصطکاک داخلی خاک ϕ قابل محاسبه هستند. تعداد شمع‌های مدل نمونه اصلی V عدد و در طول هر شمع، 6 نقطه ثبت تاریخچه‌های زمانی بارگذاری دینامیکی، تعریف شده است.

در این مقیاس ۶ رکورد زلزله مقیاس نشده حوزه‌های نزدیک و دور زلزله طبس، در ایستگاه حوزه نزدیک طبس و ایستگاه حوزه دور بجستان، هر یک شامل سه مؤلفه طولی L ، عرضی T و قائم V ، به بستر مدل عددی تفاضل محدود سه‌بعدی اعمال شده است (PEER، ۲۰۱۷).

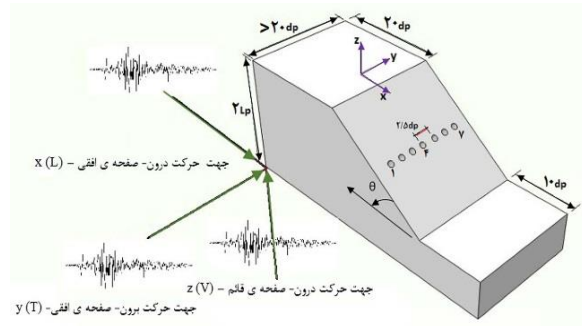
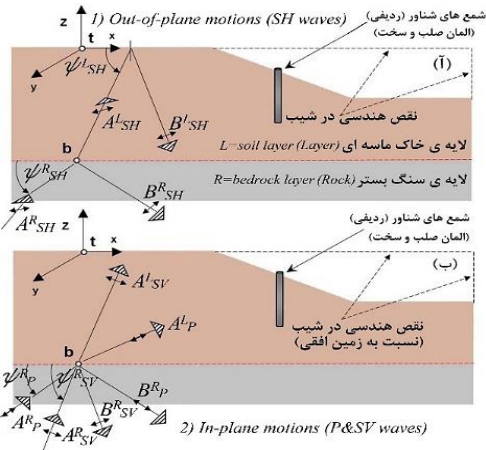
همچنین چهار حالت بارگذاری ترکیبی LTV ، LTV ، LTV و LTV نیز برای کامل کردن حالت محتمل آماری اعمال بار لرزه‌ای، به کار گرفته شده است. بنابراین، به طور کلی در مقیاس مدل‌سازی نمونه اصلی، V ترکیب بارگذاری لرزه‌ای در جهات مختلف، شامل بارگذاری‌های زلزله یک محوری (L ، T و V)، دو محوری (LTV ، LTV ، LTV) و سه محوری (LTV) به مدل شیب ماسه‌ای خشک-ردیف شمع شناور، اعمال شده است. شکل کلی هندسه مسأله در دست بررسی، به لحاظ ابعاد و شرایط مرزی آن در شکل (۱) ارائه شده است. همچنین در شکل (۱) d_p قطر شمع و L_p نماد به کار رفته برای معرفی کمیت طول شمع است.

۲۰۰۱؛ Li و همکاران، ۲۰۱۰؛ Erfani Joorabchi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Nian و همکاران، ۲۰۱۶)، روش تعادل حدی (Duncan، ۱۹۹۶)، روش بلوک لغزان نیومارک (Newmark، ۱۹۶۵؛ Al-Defae و Knappett، ۲۰۱۵)، روش اندرکنش شمع-شیب خاکی (Chen و Martin، ۲۰۰۲؛ Ashour و Ardalan، ۲۰۱۲) و روش مدل‌سازی فیزیکی به کمک سنتریفیوژ ژئوتکنیکی در میدان شتاب (Yu) N.g و همکاران، ۲۰۱۰؛ Al-Defae و Knappett، ۲۰۱۴) نام برد.

زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور، صرف‌نظر از بُعد مکانی و فاصله از منبع لرزش، با مشخصه‌های مهمی از قبیل اثرات منبع، اثرات مسیر انتشار و اثرات ساختگاه، از یکدیگر تفکیک می‌شوند. این اثرات در زلزله حوزه نزدیک شامل پدیده‌هایی همانند اثر "جهت پذیری" از نوع پیشرو، پس‌رو یا خنثی، اثرات دیواره گسل شامل اثرات فرو دیواره و فرا دیواره و نیز اثر تغییرشکلی "تغییر مکان ماندگار" می‌شوند (PEER، ۲۰۱۷).

از طرفی در بیشتر تحقیقات صورت گرفته در خصوص موضوع ردیف شمع و شیب خاکی، اصولاً مبحث تحلیل پایداری شیب (Ellis و همکاران، ۲۰۱۰؛ Ito و Matsui، ۱۹۷۵؛ Ausilio و همکاران، ۲۰۰۱؛ Li و همکاران، ۲۰۱۰؛ Erfani Joorabchi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Nian و همکاران، ۲۰۱۶؛ Duncan، ۱۹۹۶؛ Newmark، ۱۹۶۵؛ Al-Defae و Knappett، ۲۰۱۴؛ Chen و Martin، ۲۰۰۲؛ Ashour و Ardalan، ۲۰۱۲) و ضرایب اطمینان پایداری، مد نظر قرار گرفته و کمتر به مباحث تحلیل تنش- کرنش، تغییر شکل و اندرکنش لرزه‌ای-سازه‌ای بین شیب و شمع‌ها، پرداخته شده است. نوآوری دیگر تحقیق حاضر، بررسی نتایج اثرات بارگذاری‌های دینامیکی یک، دو و سه محوری تاریخچه زمانی، بر میزان تغییرشکل‌های شیب ماسه‌ای و تلاش‌های داخلی شمع‌های مسلح کننده شیب (شامل تغییر شکل، لنگر خمشی و نیروی برشی شمع‌ها) است، که تا کنون در تحقیق جامعی به آن پرداخته نشده است.

همچنین با توجه به بکر بودن موضوع مورد بررسی مقاله حاضر، صحت‌سنجی نتایج حاصل شده از آن نیز، به نوبه خود، دشوار خواهد بود، چرا که تحقیقات معتبر کاملاً مشابهی، در این زمینه در دسترس نیست. با توجه به این مهم، در این مقاله، صحت‌سنجی نتایج از طریق مدل‌سازی‌های موازی توسط مدل فیزیکی کوچک-مقیاس "یکصدم" میز لرزه الکترو-دینامیکی دو درجه آزادی (در میدان شتاب 1g) که توسط نویسندگان مقاله حاضر توسعه داده شده، صورت گرفته است. نوآوری عمده و به نحوی هدف اصلی تحقیق حاضر، برآورد اثر راستای بارگذاری لرزه‌ای، شامل بررسی اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، بر رفتار کلی متغیرهای ژئوتکنیکی و سازه‌ای، در مسأله اندرکنش دینامیکی ردیف شمع شناور-شیب ماسه‌ای خشک است، که تا به حال در هیچ مطالعه جامعی، به آن پرداخته نشده است.



شکل ۱- هندسه کلی مسأله مطالعه حاضر شامل محل شمع‌ها، ابعاد مدل و جهات بارگذاری لرزه‌ای سه محوری.

شکل ۲- انتشار امواج حجمی در شیب ماسه‌ای مسلح با ردیف شمع شناور: الف) حرکات برون- صفحه امواج SH، ب) حرکات درون- صفحه امواج SV و P (Wolf, ۱۹۸۵)

جدول ۱- مقادیر پارامترهای خاک ماسه‌ای و شمع‌های بتنی در تحلیل‌های عددی سه‌بعدی در مقیاس واقعی (پروتوتایپ)

مقادیر	نماد پارامتر (یکای پارامتر)	تعاریف پارامترها
۰	$C (kPa)$	چسبندگی خاک ماسه‌ای
۳۰	$\phi (Degree)$	زاویه اصطکاک ماسه
۰	$\psi (Degree)$	زاویه اتساع خاک ماسه‌ای
۷۷۰ و ۱۶/۶۷	$G (MPa)$ و $K (MPa)$	مدول بالک و برشی ماسه
۰.۳	$\nu (-)$	نسبت پواسون خاک ماسه‌ای
۲۹	$E_p (GPa)$	مدول ارتجاعی شمع بتنی
۰/۱	$\nu_p (-)$	نسبت پواسون شمع بتنی

مشخصات مقاومتی و سختی شمع‌های بتن مسلح و خاک ماسه‌ای در مدل‌سازی‌های عددی بزرگ-مقیاس (در مقیاس پروتوتایپ) این مقاله، در جدول (۱) ارائه شده است.

همچنین، به منظور مدل‌سازی عددی فصل مشترک شمع-خاک، از معیار مقاومت برشی کولمب با لحاظ سختی‌های نرمال (K_n) و برشی (K_s) معادل $2/5 \text{ GPa/m}$ استفاده شده است. از طرفی، زاویه اصطکاک مصالح، در محل فصل مشترک، دو سوم زاویه اصطکاک خاک ماسه‌ای، در نظر گرفته شده و مقادیر چسبندگی و زاویه اتساع مصالح نیز، در محل فصل مشترک شمع-خاک، صفر فرض شده‌اند. به علاوه، امکان تشکیل گپ (Gap formation) (تشکیل فاصله) در محل فصل مشترک، در اثر بارگذاری جانبی لرزه‌ای شمع‌ها، فعال شده است.

۳- صحت‌سنجی تغییر شکل‌های جانبی (افقی) شیب ماسه‌ای خشک مسلح یا مسلح نشده با مدل فیزیکی

در این مقاله، در ابتدا مدل‌سازی فیزیکی، برای صحت‌سنجی نتایج عددی ارائه شده در بخش‌های بعدی مطالعه حاضر، توسط ابزار میز لرزه

به منظور مدل‌سازی عددی خاک خشک ماسه‌ای، از مدل ارتجاعی-خمیری مور-کولمب با قانون جریان ناسازگار (فرض زاویه اتساع معادل صفر) استفاده شده است. همچنین، برای مدل‌سازی شمع‌های دایروی آلومینیومی (در مقیاس مدل فیزیکی) و بتنی (بزرگ-مقیاس) از مدل ارتجاعی-خطی، بهره گرفته شده است. زاویه اصطکاک خاک ماسه‌ای و زاویه شیب هر دو ۳۰ درجه انتخاب شده‌اند، تا در حالت استاتیکی، شیب دارای پایداری حداقل و در آستانه لغزش باشد. در تمام مدل‌سازی‌های عددی این تحقیق، از المان‌های سه‌بعدی چهار وجهی (tetrahedral) برای مدل‌سازی عددی محیط پیوسته خاک و از المان‌های خطی، برای مدل‌سازی شمع‌ها، استفاده شده است. هدف از لحاظ هفت ترکیب بارگذاری لرزه‌ای، مطالعه اثر جهات حرکات لرزه‌ای درون-صفحه و برون-صفحه امواج لرزه‌ای و اثر نوع امواج منتشر شده، بر رفتار ژئوتکنیکی-سازه‌ای مسأله ردیف شمع شناور-شیب ماسه‌ای خشک، مطابق شکل (۲) بوده است.

به طور کلاسیک در حالت حرکت امواج برون-صفحه، عمده امواج لرزه‌ای منتشر شده از نوع موج برشی افقی SH (شکل (۲-الف)) هستند، حال آن‌که در حالت حرکت امواج درون-صفحه، عمده امواج لرزه‌ای از نوع فشاری P یا برشی قائم SV (مطابق شکل (۲-ب)) خواهند بود. نمایش شماتیک نحوه گسترش امواج در مدل شیب ماسه‌ای-ردیف شمع شناور، شامل انعکاس، انتقال و انکسار آن‌ها، در حالات حرکات درون و برون-صفحه انتشار، مطابق شکل (۲) است. بررسی اندرکنش لرزه‌ای حرکت امواج در درون و برون-صفحه انتشار، برای زمین‌های افقی و بدون اثر شمع، تا به حال، در کتب مرجع (Wolf, ۱۹۸۵) به تفسیر مورد بررسی قرار گرفته، اما در حالت توأمان وجود زمین شیب‌دار (Bouckovalas و Papadimitriou, ۲۰۰۵) و ردیف شمع شناور، چنین مطالعه‌ای، تا کنون صورت نگرفته است. در شکل (۲) نمای L نماد مخفف لایه خاکی و نمای R معرف واژه سنگ بستر است. همچنین در این شکل A دامنه امواج منتشر شده و B دامنه امواج بازتاب یافته است. مقادیر θ نیز بیانگر زوایای برخورد امواج لرزه‌ای مختلف به سطح لایه خاک L یا سنگ بستر R هستند. از طرفی t معرف سطح لایه و b معرف کف لایه ماسه‌ای است.

جدول ۲- خلاصه مقایسه ضرایب مقیاس بین مدل و نمونه اصلی در آزمایش میز لرزه کوچک- مقیاس (Jai ۱۹۸۹)

ضریب مقیاس	ضریب مقیاس	کمیت (یکا)، یکاهای SI
مقیاس فعلی GST	در GST* (P/M)	
10^4 و 10^6	λ و λ^2 و λ^3	طول (m)، سطح (m^2) و حجم (m^3)
10^6 و 10^7	$1/10$ و λ^3	دانسیته (kg/m^3) و جرم (kg)
$1/10$ و 10^6	$1/10$ و λ	تنش کل یا مؤثر (kPa) و کرنش
10^6 و 10^4	λ^2 و λ^3	نیروی برشی یا محوری (Kn) و لنگر خمشی (kN.m)
10 و 0.1	$\lambda^{0.5}$ و $\lambda^{-0.5}$	زمان دینامیکی (sec) و فرکانس (Hz)
10^6 و 10^7	$1/10$ و $\lambda^{0.5}$	تغییر مکان (m)، سرعت (m/s) و شتاب (m/s^2)
10^4 و 10^6	λ^4	سختی خمشی شمع‌ها ($kN.m^2$) EI

* (P/M) معادل نسبت نمونه اصلی (پروتوتایپ) به مدل کوچک مقیاس: Geotechnical Shaking Table (Prototype/Model) و GST میز لرزه ژئوتکنیکی.

در مدل‌سازی‌های فیزیکی این تحقیق، برای لحاظ بیشترین اثر بارگذاری لرزه‌ای و جلوگیری از بروز پدیده تشدید، طبق این رابطه و مقدار فرکانس غالب بارگذاری لرزه‌ای (قابل کنترل توسط تنظیم میزان دور موتورهای الکتریکی میز لرزه‌ای) تناسب لازم ایجاد شده است. به طور کلی، بروز پدیده تشدید، در مدل‌سازی‌های فیزیکی میز لرزه، مسأله نامطلوبی است، زیرا موجب بروز گسیختگی‌های ناخواسته و پیش از موعد، در مدل فیزیکی می‌شود. مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده (بر اساس آزمایش دانه‌بندی استاندارد) در جدول (۳) ارائه شده است. در شکل (۴) طرح شماتیک مقطع عرضی و ابعاد مدل‌های فیزیکی مورد نظر مطالعه حاضر، نشان داده شده است. مطابق این شکل، شرط شناوری ردیف شمع‌ها، با عدم تکیه انتهای آن‌ها، به کف جعبه مدل-سازی فیزیکی یا لایه‌ای سخت‌تر، محقق شده است. در این شکل، سنسورهای شتاب با نماد Acc مشخص شده‌اند. همچنین دو عدد دوربین با وضوح بالا (۱۴ مگاپیکسل) جهت ثبت لحظات گسیختگی و تغییر شکل شیب، در حین بارگذاری دینامیکی، در پهلو و روبروی شیب نصب شده‌اند. سنسورهای اندازه‌گیری تغییر شکل در این شکل، با نماد LVDT مشخص شده است. جزئیات بیشتر ابزارهای به کار رفته، در بخش‌های پیش رو، به تفصیل بررسی می‌شوند. مشخصات مقاومتی و سختی برای خاک ماسه‌ای (حاصل از آزمایش‌های مقاومت برشی شامل برش مستقیم و سه محوری) و شمع‌های مدل آلومینیومی، به ترتیب در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین در جدول (۴) منظور از ضخامت دیواره شمع (mm) t، ضخامت جداره مقطع لوله‌ای شکل شمع‌های آلومینیومی، در مدل فیزیکی است.

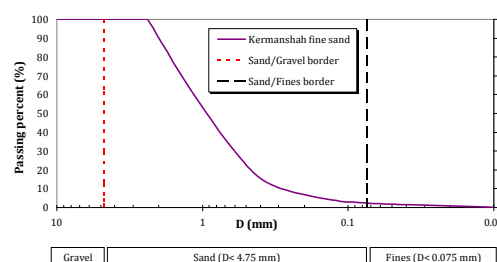
ژئوتکنیکی، انجام شده است. مدل‌سازی فیزیکی میز لرزه کوچک-مقیاس (الکترو-دینامیک دو درجه آزادی افقی) با مقیاس یک‌صدم، توسط میز توسعه داده شده توسط نویسندگان مقاله صورت گرفته است. در مدل‌سازی فیزیکی، خاک مورد آزمایش برای ساخت شیب، خاک ماسه‌ای ریز (fine sand) در حالت خشک است.

روش اصلی ساخت نمونه‌های شیب ماسه‌ای با زاویه ۳۰ درجه، با تراکم نسبی یکنواخت و همگن، به روش "ریزش خشک" به کمک ابزار قیف و لوله شرح داده شده در مراجع (Muthukkumaran ۲۰۱۳؛ Muthukkumaran و همکاران، ۲۰۰۸) بوده است. در مدل فیزیکی، تنها سه حالت تحلیل مختلف، شامل اعمال بارگذاری لرزه‌ای فقط در راستای طولی شیب (L)، در راستای عمود بر طول شیب-راستای عرضی (T) و اعمال هم‌زمان هر دو مؤلفه بارگذاری افقی (LT)، که هر کدام از این تحلیل‌ها نیز، در دو حالت تسلیح شیب با نصب ردیف شمع ۵ تایی، به فواصل مرکز به مرکز $s=3.5d_p$ و درست در وسط شیب و بدون تسلیح شیب با ردیف شمع، انجام شده است.

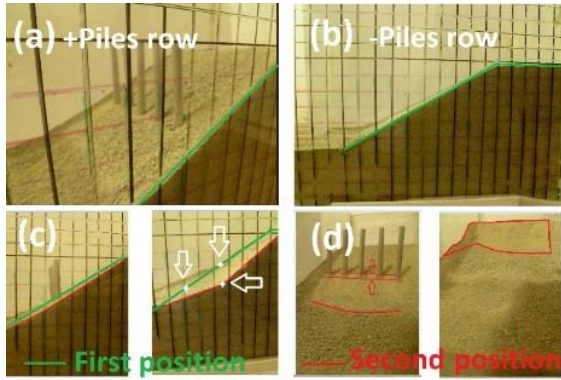
از طرفی انتخاب فاصله ردیف شمع معادل $3.5d_p$ به علت کوچک بودن مدل فیزیکی بوده و اجرای ردیف شمع در مدل فیزیکی با فواصل کمتر، عموماً با دشواری و دست‌خوردگی شکل شیب، همراه است.

شیب خاکی در مدل‌های فیزیکی کوچک-مقیاس نیز از مصالح ماسه‌ای خشک، شامل ماسه ریز و بد دانه‌بندی شده (گردآوری شده از معادن ماسه شهر کرمانشاه) تشکیل شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه خشک کرمانشاه، مطابق شکل (۳) است.

ضرایب مقیاس استفاده شده برای مدل کوچک-مقیاس میز لرزه دو درجه آزادی بین model و prototype که بر اساس تحلیل ابعادی به دست آمده‌اند، مطابق مقادیر مندرج در جدول (۲)، ارائه شده است (Jai ۱۹۸۹). مطابق جدول (۲) شتاب و فرکانس، در بارگذاری میز لرزه با مقیاس مدل یک‌صدم، به ترتیب دارای ضرایب مقیاس ۱ و ۰/۱ هستند. مطابق روابط کلاسیک مقدار پیروید طبیعی (عکس فرکانس طبیعی)، T_n ، یک لایه همگن افقی خاک معادل $4H/V_s$ Gazetas و $2.6H/V_s$ Dakoulas (۱۹۹۲) است، حال آن که مقدار این پیروید طبیعی برای سطح شیب‌دار خاک معادل $2.6H/V_s$ Dakoulas و $4H/V_s$ Gazetas (۱۹۹۲) برآورد شده است.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ماسه ریز بد دانه شده SP کرمانشاه جهت مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی



شکل ۵- مدل‌های فیزیکی کوچک-مقیاس شیب ماسه‌ای خشک: (الف) مسلح شده، (ب) مسلح نشده، (ث) و (د) موقعیت شیب با و بدون تسلیح بعد از بارگذاری لرزه‌ای در دو جهت LT در کف

در مدل فیزیکی این میز لرزه، هر موتور به تنهایی قادر است که وزن بخصوصی را با حرکت لرزه‌ای هارمونیک تناوبی سینوسی مشخصی، با حداکثر دامنه رفت و برگشت افقی $\pm 1.5\text{cm}$ و حداکثر شتاب افقی در هر راستای بارگذاری L یا T معادل $0.136g$ جابه‌جا نماید. مدل شیب‌های ماسه‌ای کوچک-مقیاس مسلح شده و مسلح نشده، پس از ۲۰ ثانیه لرزش، با دامنه لرزش رفت و برگشتی $1/5$ سانتی‌متری به شکل ترکیب بار لرزه‌ای در دو جهت LT در شکل (۵) نشان داده شده است.

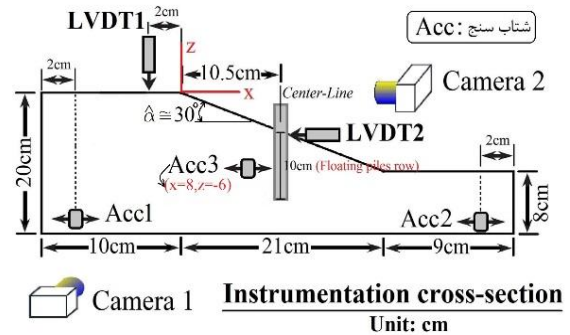
۳-۱- تفسیر نتایج صحت‌سنجی مدل فیزیکی کوچک-مقیاس شیب در آزمایش‌های میز لرزه

در این قسمت، که بخش صحت‌سنجی روش و رهیافت کلی مورد استفاده در مقاله حاضر است، نمودارهای حاصل از اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی میز لرزه کوچک-مقیاس و مدل‌سازی‌های کوچک-مقیاس عددی سه‌بعدی با منشا بارگذاری لرزه‌ای هارمونیک ارائه می‌شود. توجه شود که به علت مقیاس کوچک مدل فیزیکی، تمامی شبیه‌سازی‌های عددی آن، در مقیاس "مدل" انجام شده است.

در شکل (۶) نمودار طیف فوریه و نحوه توزیع فرکانسی بارگذاری هارمونیک سینوسی ورودی اعمال شده با دامنه $\pm 0.136g$ نمایش داده شده است. توزیع زمانی دامنه شتاب بارگذاری، در هر جهت حرکت میز لرزه، توسط سنسورهای شتاب‌سنج آمریکایی کوچک مقیاس پیزوالکتریک تک محوری (نوع CTC) ثبت شده است.

جدول ۳- مشخصه‌های فیزیکی ماسه ریز بد دانه‌بندی شده کرمانشاه، در مدل‌سازی فیزیکی میز لرزه کوچک-مقیاس

مشخصه	نماد	یکا	مقدار
طبقه‌بندی USCS	SP	-	-
حداکثر و حداقل دانسیته خشک	(γ_{dmin}) و (γ_{dmax})	gr/cm^3	$1/94$ و $1/43$
نسبت تخلخل حداکثر و حداقل	(e_{min}) و (e_{max})	-	0.82 و 0.34
چگالی بدون بعد دانه‌ها	(G_s)	-	$2/60$
قطر مؤثر و متوسط ذرات ماسه	(D_{50}) و (D_{10})	mm	0.30 و 0.92
ضریب یکنواختی و انحاء ذرات	(C_u) و (C_c)	-	$3/83$ و $1/04$
دانسیته نسبی ماسه	D_r (%)	-	$45-47$
ضریب یکنواختی $= (D_{60}/D_{10})$ و ضریب انحاء $= D_{30}^2 / (D_{60} * D_{10})$	-	-	-



شکل ۴- نمایش شماتیک ابعاد مدل فیزیکی به همراه محل نصب ردیف شمع شناور و تجهیزات ابزاربندی

جدول ۴- مشخصات مقاومتی-سختی ماسه ریز کرمانشاه و شمع-های مدل آلومینیومی در مدل میز لرزه الکترو-دینامیک

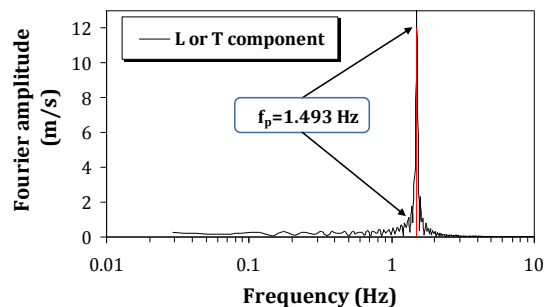
پارامترها به ترتیب	نماد (یکا) به ترتیب	مقادیر (به ترتیب)
ماسه ریز و خشک معادن رودخانه‌ای کرمانشاه	-	-
چگالی و چسبندگی	C (kPa) و γ (kn/m^3)	0 و $16/0$
زاویه اصطکاک و اتساع ماسه	ψ (deg) و ϕ (deg)	0 و $30/0$
مدول‌های بالک و برشی	G (MPa) و K (MPa)	$7/70$ و $16/67$
مدول برشی دینامیکی	G_{max} (MPa)	$10/34$
شمع‌های مدل کوچک-مقیاس توخالی آلومینیومی	-	-
مدول ارتجاعی و نسبت پواسون	E_p (GPa) و ν_p (-)	$70/0$ و $0/33$
دانسیته و ضخامت دیواره شمع	t (mm) و γ_p (kn/m^3)	$0/50$ و $27/0$
طول و قطر خارجی شمع	D_0 (mm) و L_p (mm)	$8/0$ و 200

به دست می‌دهند. در مورد سنسور شتاب استفاده شده، چون حساسیت سنسور بالاست (1000mv/g) قاعدتاً اعداد با کیفیتی به دست می‌آیند، که بعد از اصلاح خط پایه نمودار تاریخچه زمانی شتاب خام توسط "چندجمله‌ای خطی"، اعمال فیلتر با پیکربندی band-pass از نوع Butterworth در محدوده فرکانسی ۰/۱۰ تا ۲۵ هرتز، تقسیم داده‌های شتاب به حساسیت سنسور و تفریق عدد ولتاژ معادل شتاب صفر (ولتاژ شتاب ثقل صفر) سنسور از داده‌های شتاب، قابل کاربرد هستند.

برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های افقی شیب، از دو عدد LVDT ایتالیایی از نوع GEFTRAN با کورس ۱۰ سانتی‌متر که به جعبه اتصال دیتالاگر ۸ کاناله، مطابق شکل (۸) متصل شده‌اند، استفاده شده است. خروجی این نوع از ابزار نیز، از نوع ولتاژ آنالوگ است، که پس از کالیبره کردن خطی دستگاه، می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. علاوه بر اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها با سنسورهای LVDT، فیلم‌های گرفته شده از نمای کناری شیب، توسط یک دوربین با کیفیت ۱۴ مگاپیکسل، در حین بارگذاری لرزه‌ای، برای قضاوت در خصوص رفتار کمی و کیفی تغییر شکل افقی شیب، مد نظر قرار گرفته است.

در شکل (۹) به ترتیب نمودارهای پاسخ شتاب اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای شتاب به ویژه سنسور (Acc3) در مرکز شیب، برای شیب‌های مسلح نشده (شکل (۹-الف)) و شیب‌های مسلح شده (شکل (۹-ب)) نمایش داده شده است. بزرگ‌نمایی شتاب پاسخ در جسم شیب در هر دو حالت با و بدون تسلیح با ردیف شمع، در نتایج شکل (۹) مشهود است. همچنین در شکل (۹-ب) بزرگ‌نمایی شتاب با وجود ردیف شمع، بر خلاف انتظار، بیشتر از شکل (۹-الف) به دست آمده، که احتمالاً به علت هم فرکانس شدن فرکانس‌های طبیعی شمع‌های مدل آلومینیومی و روکش فلزی سنسورهای شتاب باشد.

در شکل (۱۰) تغییر مکان افقی نقطه وسط شیب (حاصل از اندازه‌گیری و مدل‌سازی عددی سه بعدی) برای حالت مسلح نشده با ردیف شمع مدل آلومینیومی (شکل (۱۰-الف)) و برای حالت مسلح شده (شکل (۱۰-ب)) تحت بارگذاری لرزه‌ای در چند جهت، در مقیاس "مدل" فیزیکی، ارائه شده است. مجدداً مطابق شکل (۱۰)، ردیف شمع شناور، همانند ردیف شمع‌های اتکایی، باعث کاهش تغییر مکان افقی شیب ماسه‌ای (از ۸ به ۵ سانتی‌متر) شده است. نکته مهم در شکل (۱۰-الف) آن است که پاسخ تغییر مکان افقی مؤلفه عرضی T به تنهایی، بر خلاف انتظار، بیشتر از پاسخ تغییر مکان مؤلفه‌های بارگذاری L یا ترکیب LT شده است و دلیل عمده آن اثر ابعاد بارگذاری و سایز مدل‌های عددی- فیزیکی کوچک- مقیاس انتخاب شده برای تحلیل است، زیرا تابع بارگذاری شتاب هارمونیک انتخاب شده برای هر دو جهت افقی طولی و عرضی، مدل‌های فیزیکی- عددی یکسان است، از طرفی عرض مدل فیزیکی و عددی در هر دو حالت، کوچک‌تر از طول آن است، بنابراین با تابع بارگذاری شتاب یکسان، درصد تغییر شکل‌های بیشتری در ابعاد عرضی کمتر، ایجاد خواهد شد.



شکل ۶- نمایش تغییرات دامنه طیف فوری به فرکانس غالب برای بارگذاری هارمونیک لرزه‌ای میز لرزه



شکل ۷- نصب سنسور شتاب سنج پیزوالکتریک تک محوری با حساسیت بالای 1000mv/g در کف جعبه مدل‌سازی میز لرزه (با محدوده فرکانسی ۰/۱۰ تا ۱۰ کیلوهرتز)



شکل ۸- سیستم جمع‌آوری اطلاعات تغییر شکل شیب در مدل فیزیکی شامل LVDT، جعبه اتصال دیتالاگر و مدار رابط رایانه

این سنسورها، در راستاهای مختلف، در محل صفحات میز لرزه و نقاط مختلف جعبه مدل‌سازی (در کف جعبه و درون شیب) نصب شده‌اند (مطابق شکل (۷)). اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری سنسورهای شتاب، داده‌های خامی هستند، که باید پس پردازش، تصحیح و تبدیل واحد شوند.

برای اتصال سنسورهای شتاب به کامپیوتر، از یک کارت با ۵ کانال ورودی آنالوگ سرعت بالا، با رزولوشن ۱۴ بیت (14 bit) استفاده شده است. در سر راه داده‌های شتاب تا کارت، از مبدل سیگنال کادیشنر جریان مستقیم، جهت پالایش کمی داده‌های ولتاژی شتاب، استفاده شده است. اصولاً خروجی انواع مختلف سنسورهای استفاده شده در این مطالعه، از نوع ولتاژ (میلی ولت) و خروجی‌های الکتریکی گروه آنالوگ است. برای مثال هم سنسور شتاب و هم مبدل‌های خطی تغییر شکل (LVDT) نصب شده در مدل فیزیکی، همگی خروجی‌های آنالوگ ولتاژ

۴- مرور فرضیات مدل سازی عددی بزرگ-مقیاس تحقیق

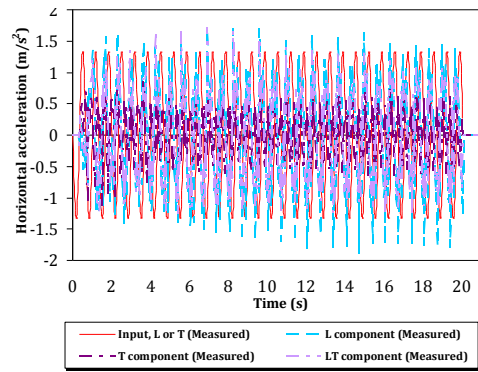
چنانچه قبلاً نیز بدان اشاره شد، برای مدل سازی عددی سه بعدی مسأله اندرکنش دینامیکی شیب ماسه‌ای خشک-ردیف شمع شناور، از روش عددی تفاضل محدود سه بعدی، در قالب مدل سازی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ (Itasca, ۲۰۰۵) بهره گرفته شده است. برای انجام هر نوع مدل سازی دینامیکی، ابتدا نیاز است که فایل پیش تحلیل استاتیکی، برای ایجاد شرایط تنش‌های برجا پیش از وقوع بارگذاری دینامیکی (لرزه‌ای) ایجاد گردد. فایل پیش تحلیل استاتیکی با پیکربندی دینامیکی صریح، در محیط برنامه $FLAC^{3D}$ قبل از اجرای تحلیل‌های دینامیکی اصلی ایجاد شده و نیروهای نامتعادل گره‌ای آن به میزان مطلوب (یعنی در حد 1×10^{-6}) کاهش یافته است. اندرکنش دینامیکی لحاظ شده بین خاک و ردیف شمع شناور، از نوع اندرکنش مستقیم با محاسبه همزمان اندرکنش‌های اینرسی و جنبشی مجموعه مدل سه بعدی، در نظر گرفته شده است.

در تحلیل‌های غیر-خطی این مطالعه، نسبت میرایی بحرانی مستقل از فرکانس مصالح مختلف (میرایی هیستریزس)، برابر نسبت متداول ۵٪ لحاظ شده و به کمک مفهوم میرایی محلی توسط رابطه (۴) در کدهای نوشته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ وارد شده است:

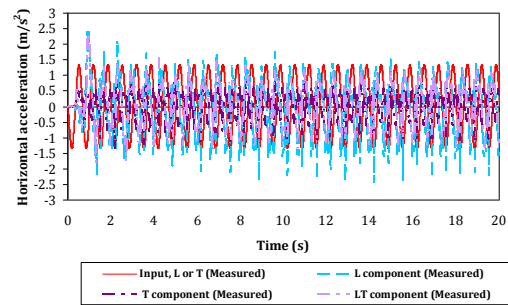
$$\alpha_L = \pi D = \pi \times 0.05 = 0.157 \quad (۴)$$

که در این رابطه، α_L میرایی هیستریزس محلی مصالح مختلف، در نرم-افزار $FLAC^{3D}$ و D نسبت میرایی بحرانی در مصالح ژئومتریال و معادل مقدار متداول ۵ درصد انتخاب شده است. همچنین شرایط مرزی در فایل‌های استاتیکی و دینامیکی تحلیل مدل‌ها، با یکدیگر متفاوت است، به طوری که در فایل پیش تحلیل استاتیکی شرایط مرزی جوانب مدل از نوع غلنگی و شرایط مرزی کف مدل گیردار است، حال آن که در فایل تحلیل دینامیکی، از شرایط مرزی شامل "میدان آزاد" (free field) و نیز مرزهای آرام (quiet) در جوانب مدل، برای جلوگیری از بازگشت امواج لرزه‌ای به داخل مدل عددی، انعکاس و انکسار ناخواسته امواج و پیشگیری از ایجاد خطای تحلیل لرزه‌ای استفاده شده است. همچنین بارگذاری لرزه‌ای در جهات مختلف مدل‌های عددی، با فرض بستر صلب (rigid base) و به صورت رکوردهای شتاب، به بستر مدل عددی، اعمال شده است (Itasca, ۲۰۰۵).

نمایش توزیع زمانی زلزله‌های طبس، در ایستگاه‌های طبس (حوزه نزدیک) و ایستگاه بَجستان (حوزه دور)، در شکل (۱۱) ارائه شده است. مطابق شکل (۱۱-ب)، تأخیر واضحی، در حدود ۲۵ ثانیه، در رسیدن الگوی شوک اصلی (main shock) شتاب زلزله طبس، به علت فاصله دور ایستگاه بَجستان، از رومرکز زلزله در ایستگاه طبس، قابل مشاهده است.



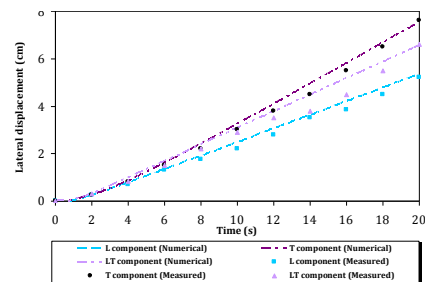
(الف)



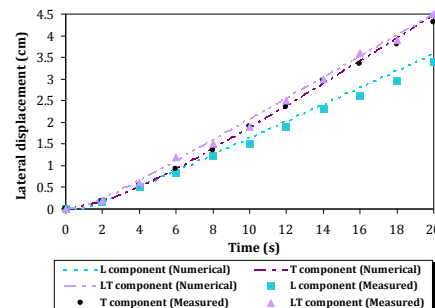
(ب)

شکل ۹- پاسخ شتاب بارگذاری هارمونیک میز لرزه در حالات: (الف) شیب مسلح نشده، (ب) شیب مسلح شده با ردیف شمع

از طرفی در شکل (۱۰-ب) به دلیل تسلیح شیب با ردیف شمع، الگوی موردنظر نویسندگان مقاله، تا حدودی بهتر به دست آمده، چرا که بخشی از انرژی حاصل از بارگذاری لرزه‌ای عرضی T توسط شمع‌ها جذب و دفع گردیده است، که در شکل (۱۰-الف) اصولاً امکان رخداد چنین استهلاکی وجود ندارد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- پاسخ تغییر مکان افقی وسط شیب ماسه‌ای در حالات: (الف) شیب مسلح نشده، (ب) شیب مسلح شده با ردیف شمع

جدول ۵- پارامترهای اساسی رکوردهای زلزله طیس برای اعمال بارگذاری‌های چند جهته (PEER، ۲۰۱۷)

پارامترهای اساسی رکوردها ایستگاه‌ها	R_{fb} (km)	V_{s30} (m/s)	شدت آریاس (m/s)	شتاب حداکثر PGA(g)
تَبَسْتان (FF)	۱۱۹/۷۷	۳۷۷/۵۶	۰/۱۰	۰/۰۹۴
طیس (NF)	۱/۷۹	۷۶۶/۷۷	۱۱/۸	۰/۸۶

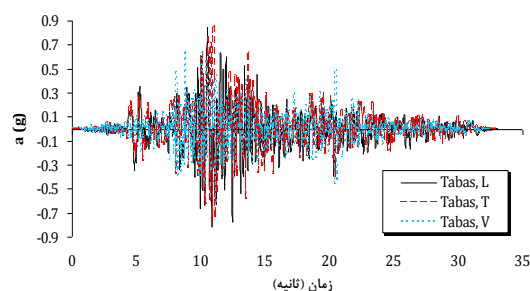
چنانچه از شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب) مشخص است، دامنه فرکانسی این دو زلزله "حدود ده برابر" با یکدیگر، اختلاف مقدار دارند. همچنین مطابق این شکل، فرکانس غالب مؤلفه‌های افقی زلزله ایستگاه طیس (مؤلفه‌های L و T) کوچک‌تر از فرکانس غالب مؤلفه‌های نظیر، در زلزله ایستگاه بَجَسْتان است. به طور کلی یکای طیف دامنه فوریه (FAS=Fourier Amplitude Spectrum) می‌تواند به صورت (g.s) یا (g/Hz) بیان شود، که در آن‌ها g شتاب ثقل و معادل $9/81 (m/s^2)$ است، که این مقدار در تبدیل واحدها باید لحاظ شود.

نوک و سر شمع‌ها، هر دو در مقابل درجات آزادی شامل انتقال و دوران آزاد هستند و با این تفسیر شرایط مرزی سر شمع‌ها از نوع سر آزاد است. برای تحلیل و درک بهتر رفتارهای تغییر شکلی مدل‌ها، از دو منطق مدل‌سازی کرنش کوچک و "کرنش بزرگ" به طور هم‌زمان استفاده شده است. همچنین، برای استخراج تمامی خروجی‌های نموداری این تحقیق، از نتایج مدل‌سازی با منطق کرنش کوچک و برای استخراج خروجی‌های گرافیکی، از نتایج مدل‌سازی منطق کرنش بزرگ استفاده شده است.

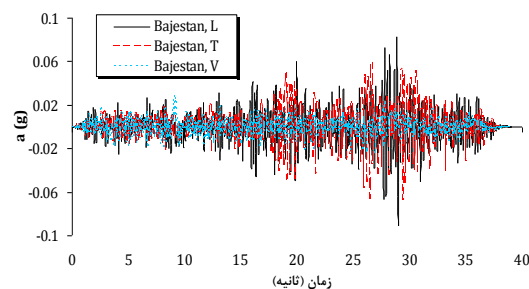
در جدول (۵) پارامترهای اساسی رکوردهای زلزله طیس، که در بارگذاری‌های لرزه‌ای چند جهته این مطالعه، به کار برده شده، ارائه شده اند. همچنین، در جدول (۵) پارامتر R_{fb} معادل نزدیک‌ترین فاصله افقی بین محل صفحه گسیختگی گسل مسبب زلزله تا سایت ثبت رکورد زلزله، V_{s30} متوسط سرعت موج برشی مصالح ساختمانی، تا عمق ۳۰ متری، در ایستگاه ثبت رکورد زلزله، شتاب حداکثر (PGA) برابر حداکثر دامنه شتاب زلزله، در کل طول رخداد زلزله و شدت آریاس برابر حاصل-ضرب سطح زیر نمودار (یعنی انتگرال) مجذور شتاب زلزله $(a(t))^2$ در ضریب ثابت $(\pi/2g)$ در طول کل زمان رخداد زلزله است، که در آن g شتاب ثقل و معادل $9/81 (m/s^2)$ است.

۵- نتایج تحلیل‌های عددی سه‌بعدی بزرگ-مقیاس

جهت استخراج نتایج خروجی‌های سازه‌ای مورد نظر در این بخش، مقادیر حداقل تعداد ۱۷۶۴ (یعنی حاصل ضرب حالات آماری: ۶ تحلیل \times ۷ حالت بارگذاری \times ۷ شمع در ردیف شمع \times ۶ نقطه در طول هر شمع) تحلیل تاریخچه زمانی سه‌بعدی استخراج شده است. منظور از شش تحلیل نیز، حاصل ضرب آماری حالات انجام حداقل تحلیل‌های

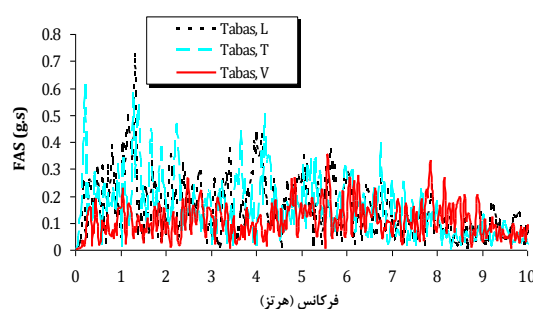


(الف)

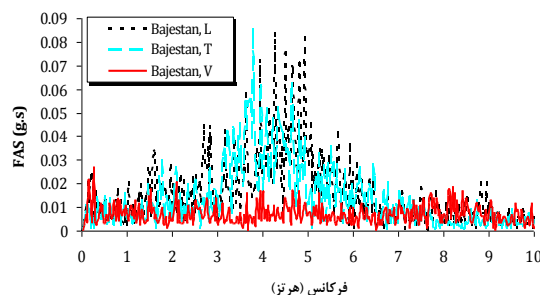


(ب)

شکل ۱۱- رکوردهای زلزله: الف) حوزه نزدیک (ایستگاه طیس)، ب) حوزه دور (ایستگاه بَجَسْتان) مورد استفاده در تحلیل‌ها

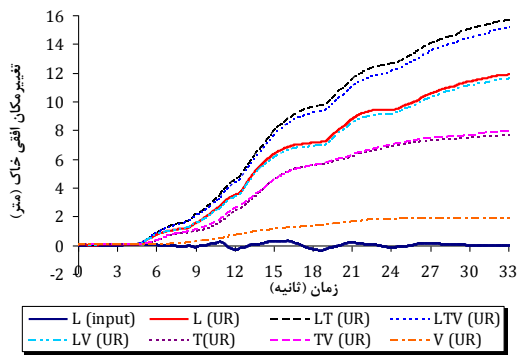


(الف)

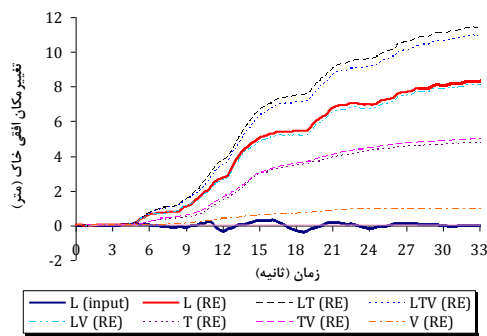


(ب)

شکل ۱۲- طیف فوریه رکوردهای زلزله: الف) حوزه نزدیک (ایستگاه طیس)، ب) حوزه دور (ایستگاه بَجَسْتان)

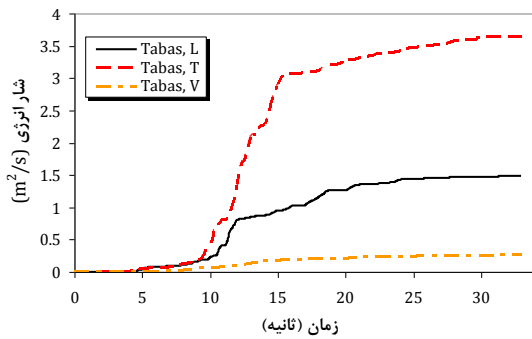


(الف)

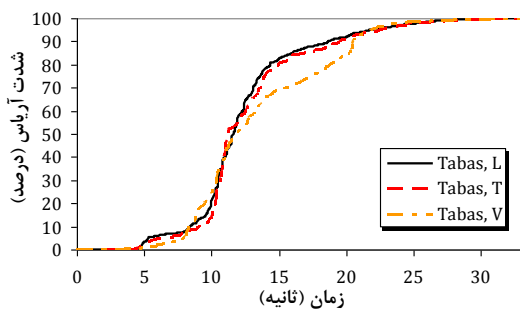


(ب)

شکل ۱۳- پاسخ تغییر مکان افقی وسط توده شیب در حالات: (الف) بدون تسلیح، (ب) با تسلیح در زلزله حوزه نزدیک طبس



(الف)



(ب)

شکل ۱۴- شباهت توزیع های زمانی: (الف) شار انرژی، (ب) شدت آریاس مؤلفه های زلزله حوزه نزدیک طبس به پاسخ تغییر مکان ماندگار شیب

عددی مجزا، توسط اعمال دو رکورد زلزله انتخاب شده (شامل رکورد حوزه نزدیک ایستگاه طبس و رکورد حوزه دور ایستگاه یجستان) برای سه پارامتر سازه‌های مستقل تغییر شکل جانبی (افقی)، نیروی برشی و لنگر خمشی در شمع‌ها است.

۵-۱- نتایج ژئوتکنیکی حاصل از اندرکنش دینامیکی ردیف شمع شناور- شیب ماسه‌ای خشک در مدل‌های عددی بزرگ-مقیاس

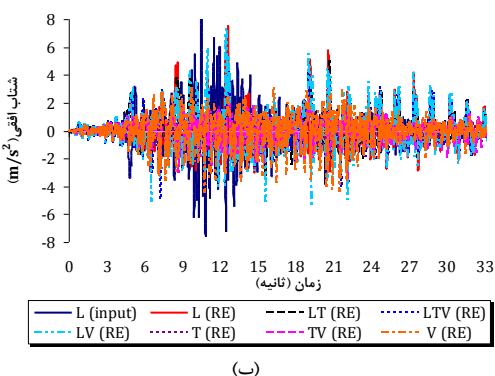
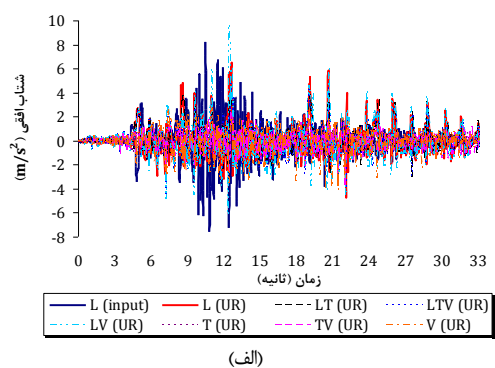
عمده‌ترین نتیجه ژئوتکنیکی که بیشتر مطالعات فعلی (Yu و همکاران، ۲۰۱۰؛ Al-Defae و Knappett، ۲۰۱۴) و نیز پژوهش‌های پیشین (Li و همکاران، ۲۰۱۰) به دنبال یافتن مقدار و الگوی آن بوده اند، برآورد میزان "تغییر شکل ماندگار" شیب مسلح شده با ردیف شمع، تحت بارگذاری لرزه‌ای زلزله بوده است.

مطابق نتایج تحقیق حاضر، در بارگذاری‌های لرزه‌ای چند جهتی واقعی، شامل اندرکنش خاک- شمع (SPI)، در زلزله‌های حوزه دور، اصولاً شامل تغییر مکان‌های ماندگار کوچکی با روند نوسانی و دارای هم-زمانی (Synchronism) یا غیر هم‌زمانی (Asynchronism) در مقایسه با رکورد ورودی بستر است، حال آن که رکورد های زلزله حوزه نزدیک در بارگذاری چند جهته، تغییر مکان‌هایی ماندگار، مشخص و بدون نوسان (و هم‌زمانی یا غیر هم‌زمانی، با رکورد ورودی بستر) ایجاد می‌کنند.

توضیح آن که منظور از "هم‌زمانی"، هم‌فاز بودن دو منحنی پاسخ، برای مثال دو پاسخ تغییر مکان یا شتاب (در حین صعود و نزول) در یک زمان ثابت و مشخص است. در حالی که، غیر هم‌زمانی، شامل ایجاد پاسخ‌هایی با فاز مخالف، برای یک نقطه مشخص در زمانی مشخص است. برای مثال، در پاسخ غیر هم‌زمان برای دو منحنی، پاسخ یک منحنی در اوج و دیگری در قعر است و یا یک منحنی دارای روندی صعودی و دیگری دارای روند نزولی است. به طور کلی رخداد شرایط هم‌زمانی و غیر هم‌زمانی، عموماً وابسته به محتوای فرکانسی بارگذاری زلزله ورودی و فرکانس طبیعی شیب است.

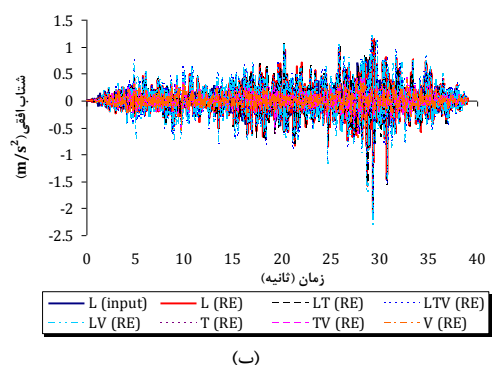
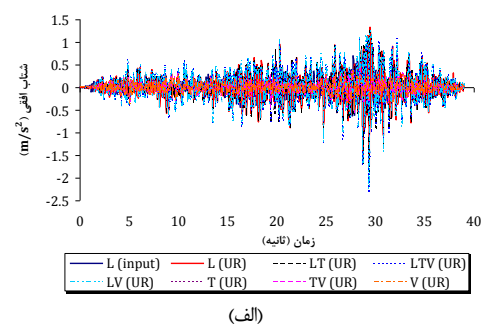
مطابق شکل‌های (۱۳-الف) و (۱۳-ب)، برای رکورد حوزه نزدیک طبس، در ایستگاه طبس، مقدار پاسخ بیشینه تغییر مکان افقی ماندگار وسط توده شیب‌دار تحت بارگذاری چند جهته، در حالت مسلح نشده با ردیف شمع شناور، حدود ۵۰٪ بیشتر از حالت مسلح شده است (یعنی تفاضل ۵ متری تغییر شکل‌های تجمعی برابر ۱۵ و ۱۰ متر).

همچنین مطابق شکل (۱۴) الگوی توزیع زمانی پاسخ‌های تغییر مکان افقی ماندگار شیب (همانند شکل قبلی)، "دقیقاً مشابه" الگوی زمانی توزیع شار انرژی و شدت آریاس زلزله است و این حالت از تشابه، فقط برای زلزله‌های با شدت انرژی بالا در حوزه نزدیک، قابل مشاهده است و مطابق یافته‌های این مطالعه، در زلزله‌های حوزه دور، چنین تشابهی وجود ندارد.

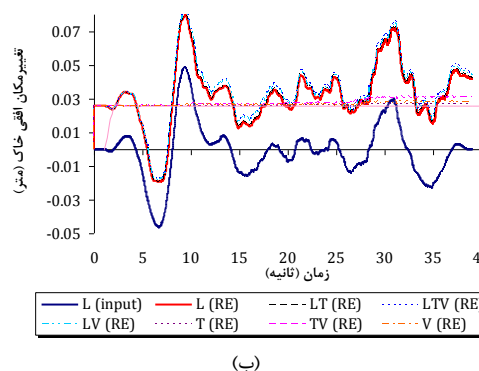
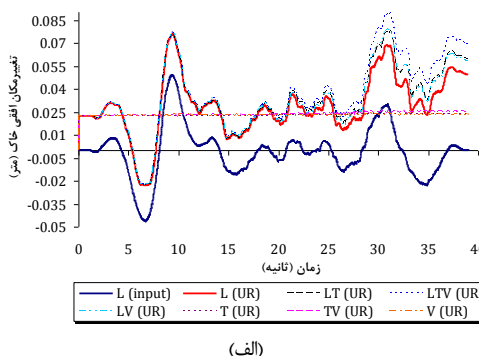


شکل ۱۵- پاسخ شتاب افقی وسط توده شیب در حالات: (الف) بدون تسلیح، (ب) با تسلیح در زلزله حوزه دور بجهستان

در شکل (۱۵) پاسخ تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی شیب در اثر اعمال ترکیبات جهتی مؤلفه‌های مختلف زلزله حوزه دور طیس، در ایستگاه بجهستان، نشان داده شده است. مطابق این شکل چه در حالت مسلح شده با ردیف شمع شناور (شکل ۱۵-ب)) و چه در حالت مسلح نشده (شکل ۱۵-الف)) پاسخ تغییر مکان ماندگاری در شیب به دست نیامده و فقط اثرات هم‌زمانی و غیرهم‌زمانی با مؤلفه ورودی زلزله دیده می‌شود. در پاسخ برخی مؤلفه‌ها، همانند مؤلفه قائم این زلزله، مقداری پاسخ ماندگار ناچیز به شکل یک خط افقی، در این شکل‌ها و در حالت غیرهم‌زمانی با مؤلفه ورودی زلزله دیده می‌شود. علل اصلی رخداد این مسائل نیز، بحث هم‌راستایی یا عدم هم‌راستایی جهات بارگذاری زلزله، با جهت لغزش شیب و نیز محتوای انرژی لرزهای پایین این زلزله است. در شکل (۱۶) پاسخ‌های شتاب در شیب مسلح نشده، بدون ردیف شمع (شکل ۱۶-الف)) و مسلح شده با ردیف شمع (شکل ۱۶-ب)) تحت اثر زلزله طیس، نشان داده شده است. مطابق این شکل، وجود ردیف شمع باعث کاهش دامنه شتاب پاسخ تا حد 2 m/s^2 می‌گردد. همچنین بزرگ‌نمایی شتاب پاسخ شیب، نسبت به ورودی شتاب اولیه (نمودار تیره رنگ در زمینه گراف‌ها)، برای ترکیبات مختلف جهات بارگذاری، در حالت شیب مسلح شده، کمتر شده است. دلیل این امر نیز جذب بخشی از انرژی لرزهای زلزله، توسط ردیف شمع‌ها است.

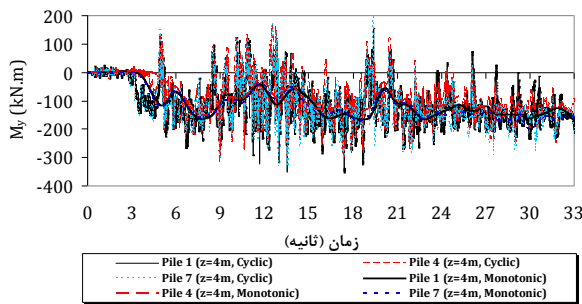


شکل ۱۶- پاسخ شتاب افقی وسط توده شیب در حالات: (الف) بدون تسلیح، (ب) با تسلیح در زلزله حوزه دور بجهستان



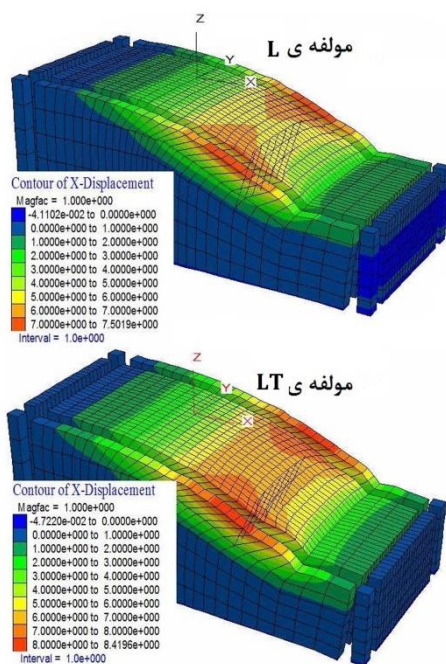
شکل ۱۶- پاسخ تغییر مکان افقی وسط توده شیب در حالات: (الف) بدون تسلیح، (ب) با تسلیح در زلزله‌های حوزه دور بجهستان

در شکل (۱۷) پاسخ شتاب شیب، به بارگذاری زلزله حوزه دور ایستگاه بجهستان، در حالات مسلح نشده با ردیف شمع شناور (شکل



شکل ۱۷- نمونه توزیع زمانی پاسخ لنگر خمشی در ترکیب LTV زلزله

طیس، برای سه شمع از ردیف شمع، در عمق ۴ متری



شکل ۱۸- نمونه توزیع زمانی پاسخ لنگر خمشی در ترکیب LTV زلزله

طیس، برای سه شمع از ردیف شمع، در عمق ۴ متری

شکل ۱۹- تغییر مکان جانبی شیب مسلح شده تحت اثر مؤلفه‌های (الف) در جهت افقی طولی (L) و (ب) ترکیب مؤلفه‌های افقی طولی و عرضی LT در زلزله حوزه نزدیک طیس

در شکل (۱۹) نمونه پاسخ‌های حاصل از کاربرد منطق کرنش بزرگ در مدل‌سازی عددی، در خصوص تغییر شکل‌های جانبی شیب، تحت اثر ترکیب بارگذاری یک محوری (L) و دو محوری (LT) (بارگذاری در دو جهت) زلزله حوزه نزدیک طیس، نمایش داده شده است. مطابق این شکل، به علت محتوای انرژی لرزه‌ای بسیار بالای این زلزله، تغییر مکان‌های تجمعی نسبتاً زیادی حاصل شده است. همچنین مطابق شکل (۱۹-ب)، مقادیر بیشینه تغییر مکان جانبی، تحت اثر بارگذاری دو محوری بزرگ‌تر از بارگذاری معمول یک محوری، به دست آمده است.

به طور کلی در تمامی نمودارهای ارائه شده در ادامه این بخش از مقاله، به علت کثرت پاسخ‌های نموداری محاسبه شده و امکان ایجاد

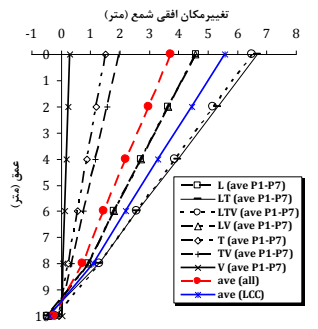
(۱۷-الف) و مسلح شده با یک ردیف شمع شناور (شکل (۱۷-ب))، نشان داده شده است. مطابق این شکل، چه در حالت مسلح شده و چه در حالت غیر مسلح، شتاب پاسخ در مؤلفه‌های بارگذاری، شامل مؤلفه طولی (L)، به طور نقطه‌ای و لحظه‌ای دچار بزرگ‌نمایی شده است، حال آن که در پاسخ‌های شامل ترکیب مؤلفه‌های عرضی T یا قائم V (بدون حضور مؤلفه طولی) چنین بزرگ‌نمایی‌های لحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. علت رخداد این امر نیز، به دلیل عدم هم‌راستایی جهت اعمال مؤلفه‌های بارگذاری T و V با راستای سطح لغزش شیب (جهت L) است.

۲-۵- نتایج سازه‌ای حاصل از اندرکنش دینامیکی ردیف شمع شناور- شیب ماسه‌ای خشک

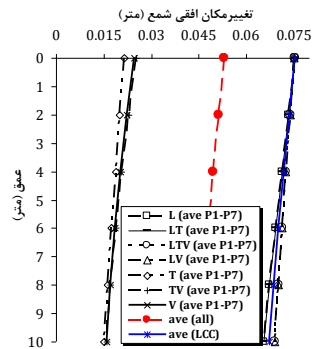
مطابق شکل (۱) در قبل، تغییر مکان شمع، D_{xp} که در راستای سطح لغزش و نیز در طول شیب است و مقدار لنگر خمشی شمع M_{py} حول محور - لامد نظر است. همچنین نیروی برشی شمع F_x در راستای سطح لغزش شیب (شکل (۱)) از اهمیت محاسباتی برخوردار است. از این رو، سه تلاش داخلی سازه‌ای شمع‌ها (D_{xp} , F_x , M_y) به عنوان خروجی‌های اصلی سازه‌ای، در نظر گرفته می‌شوند.

نمونه خروجی لنگر خمشی غالب M_y (خمش حول محور -y) در شمع‌های اصلی شماره ۱ (شمع گوشه سمت چپ درون ردیف شمع در مدل شیب)، شمع مرکزی شماره ۴ و شمع کناری شماره ۷ در عمق ۴ متری، برای ترکیب بارگذاری لرزه‌ای سه محوری (در سه جهت) LTV زلزله حوزه نزدیک طیس، در شکل (۱۸) ارائه شده است. در این تحقیق، در اجرای تحلیل‌های عددی سه بعدی اندرکنشی شیب-ردیف شمع، از روش اندرکنش خاک-سازه مستقیم استفاده شده و هر دوی اندرکنش‌های سینماتیک و اینرسی، به طور هم‌زمان، در محاسبات مورد نظر، لحاظ شده‌اند (Wolf, ۱۹۸۵).

بنابر این، مطابق نمودارهایی که در شکل (۱۸) رسم شده، پاسخ‌های حاصل شده، شامل یک روند (یعنی پاسخ مونوتونیک معادل اندرکنش سینماتیک- منحنی‌های رسم شده با خطوط ضخیم‌تر) و یک رفتار نوسانی (یعنی پاسخ سیکلی معادل اندرکنش اینرسی- منحنی‌های رسم شده با خطوط نازک‌تر) هستند. این دو مورد، در نمودارهای شکل (۱۸) به طور مشخصی، قابل مشاهده و تفکیک است. پاسخ‌های مونوتونیک، با عبور پاسخ‌های کلی حاصل شده، از فیلتر حداقل پایین‌گذر (lowpass) ممکن، با بزرگی ۰/۰۱ هرتز به دست آمده‌اند. در واقع دامنه نوسان‌های نمودارها، که معادل پاسخ‌های سیکلی هستند، با این روش، حذف شده و جواب خالص مونوتونیک به دست آمده است.

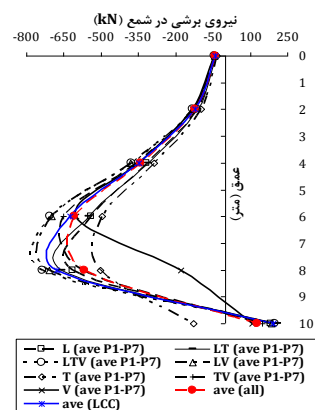


(الف)

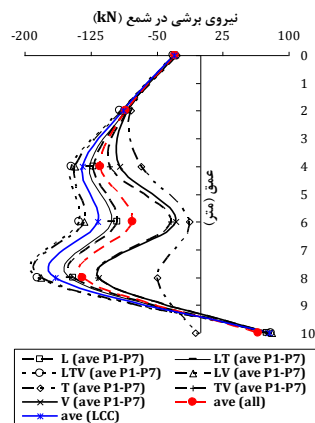


(ب)

شکل ۲۰- تغییر مکان افقی در طول شمع‌ها تحت ترکیبات جهات مختلف زلزله‌های حوزه: الف) نزدیک طبس، ب) دور بجستان



(الف)



(ب)

شکل ۲۱- نیروهای برشی در طول شمع‌ها تحت ترکیبات جهات مختلف زلزله‌های حوزه: الف) نزدیک طبس، ب) دور بجستان

ابهام و سردرگمی در تفسیر نتایج، نمودارها به شکل میانگین نتایج، برای تعداد هفت شمع موجود در ردیف شمع، یعنی ave P1-P7 به دست آمده و برای ۷ ترکیب بارگذاری مختلف، به طور هم‌زمان، رسم شده‌اند. همچنین در این شکل‌ها، منظور از میانگین نتایج برای ترکیبات بارگذاری جهتی، شامل مؤلفه طولی L از قبیل L، LT، LTV و LV (چهار ترکیب از هفت ترکیب بارگذاری در جهات مختلف) است. از طرفی، منظور از all نیز، ارائه و محاسبه میانگین نتایج، برای تمامی هفت ترکیب بارگذاری، در جهات مختلف است.

در شکل (۲۰) نمودارهای تغییر مکان جانبی افقی شمع، برای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، تحت ترکیبات بارگذاری جهتی هفت‌گانه، نشان داده شده است. مطابق شکل (۲۰-الف) در زلزله حوزه نزدیک، حرکت جانبی گوه گسیختگی شیب، با مقادیر کمی بسیار بزرگ‌تری، نسبت به زلزله حوزه دور اتفاق می‌افتد. به علاوه، در زلزله‌های حوزه نزدیک، با افزایش عمق، مقادیر تغییر شکل جانبی (یعنی خطوط نموداری مایل) کاهش می‌یابند و الگوی رخداد آن‌ها به صورت یک حرکت بلوک صلب است. حال آن که مطابق شکل (۲۰-ب) در زلزله حوزه دور، به علت محتوای انرژی پایین‌تر، مقادیر کمی تغییر مکان جانبی گوه گسیختگی شیب، ناچیز و با افزایش عمق کاهش ناچیزی (خطوط نموداری تقریباً قائم) دارند. از طرفی در حرکت جانبی گوه گسیختگی، تحت اثر زلزله حوزه دور، حرکت منسجم و یکپارچه‌ای در تمامی طول شمع‌ها به صورت جسم صلب مشاهده نمی‌شود، بلکه یک گوه انعطاف‌پذیر، با حرکات جانبی جزئی ایجاد می‌شود.

در شکل (۲۱-الف) نمودار توزیع نیروی برشی درون شمع‌ها ناشی از اعمال زلزله حوزه نزدیک، در جهات مختلف و در شکل (۲۱-ب) نیروی برشی حاصل از اعمال زلزله حوزه دور، نمایش داده شده است. مطابق شکل (۲۱)، الگوی شکلی تک قله‌ای، برای توزیع عمقی نیروی برشی حاصل از اعمال زلزله حوزه نزدیک و دو قله‌ای برای زلزله حوزه دور، یک الگوی کلی بوده، به طوری که برای تمام شمع‌های درون ردیف شمع، این الگوی کلی، در نمودارهای پاسخ نیروی برشی در عمق، تکرار می‌شود. علت اصلی ایجاد این اختلاف در شکل نمودارها نیز، تفاوت در شکل گوه‌های گسیختگی شکل گرفته در شیب، به علت اعمال زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، در جهات مختلف است.

در شکل (۲۲) تغییرات لنگر خمشی شمع‌ها با عمق، برای مؤلفه‌های زلزله حوزه نزدیک (شکل ۲۲-الف) و حوزه دور (شکل ۲۲-ب) ارائه شده است. مطابق این شکل، عمق رخداد حداکثر لنگر خمشی شمع، در زلزله حوزه نزدیک، عمیق‌تر از زلزله حوزه دور است. دلیل اصلی این موضوع نیز، تفاوت در شکل گوه گسیختگی شیب، تحت اثر جهات بارگذاری مختلف، این دو نوع زلزله است. به علاوه، الگوی شکلی برخی مؤلفه‌های زلزله حوزه دور، همانند مؤلفه عرضی یا قائم به علت محتوای انرژی پایین انرژی این مؤلفه‌های زلزله، مطابق الگوی کلی عمقی مورد نظر، حاصل نشده است.

۲- مؤلفه‌های در جهت خارج صفحه بارگذاری لرزه‌ای، همانند مؤلفه عرضی زلزله T (مولد امواج برشی SH) نیز در صورت وجود اثرات ساختگاهی همانند اثرات جهت‌پذیری، می‌توانند پاسخی به بزرگی مؤلفه‌های در صفحه زلزله، همانند مؤلفه طولی زلزله L (مولد امواج P و SV) ایجاد کنند. حرکت جانبی گوه لغزنده شیب، در زلزله حوزه نزدیک، به صورت بلوکی یکپارچه و صلب است، حال آن که حرکت گوه گسیختگی شیب، تحت اثر زلزله حوزه دور، ناچیز و به شکل بلوکی انعطاف‌پذیر است.

۳- الگوی عمقی تابع لنگر خمشی شمع‌ها، برای زلزله‌های حوزه نزدیک یک الگوی ثابت تک قله‌ای و برای زلزله‌های حوزه دور یک الگوی مشخص دو قله‌ای دارد.

۷- مراجع

شوش‌پاشا ع، سعیدی ب، "ارزیابی مقاومت اصطکاکی شمع و پارامترهای مؤثر بر آن در خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش بارگذاری"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵، ۴۶ (۳)، ۳۹-۵۰.

شوش‌پاشا ع، شرف‌خواه م، "مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی نشست شمع‌های بتنی درجا در ماسه"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۲، ۴۳ (۴)، ۳۵-۴۵.

Al-Defae AH, Knappett JA, "Centrifuge modelling of the seismic performance of pile-reinforced slopes", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140 (6), 1-13.

Al-Defae AH, Knappett JA, "Newmark sliding block model for pile-reinforced slopes under earthquake loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 75, 265-278.

Ashour M, Ardalan H, "Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction", Computers and Geotechnics, 2012, 39, 85-97.

Ausilio E, Conte E, Dente G, "Stability analysis of slopes reinforced with piles", Computers and Geotechnics, 2001, 28 (5), 591-611.

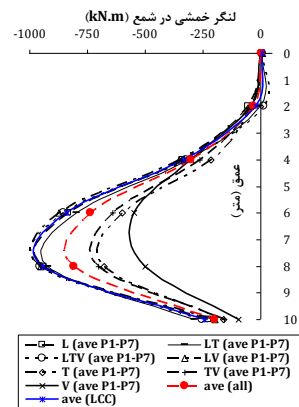
Bouckovalas GD, Papadimitriou AG, "Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25, 547-558.

Chen C, Martin G, "Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles", Computers and Geotechnics, 2002, 29 (10), 363-86.

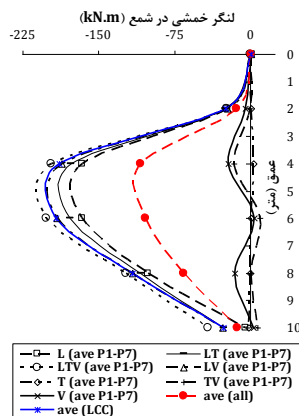
Duncan JM, "State of the Art: limit equilibrium and finite element analysis of slope", Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122 (7), 577-95.

Ellis EA, Durrani IK, and Reddish DJ, "Numerical modeling of discrete pile rows for slope stability and generic guidance for design", Geotechnique, 2010, 60 (3), 185-195.

Erfani Joorabchi A, Liang RY, Li L, Liu H, "Yield acceleration and permanent displacement of a slope reinforced with a row of drilled shafts", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 57, 68-77.



(الف)



(ب)

شکل ۲۲- لنگرهای خمشی در طول شمع‌ها تحت ترکیبات جهات مختلف زلزله‌های حوزه: (الف) نزدیک طبس، (ب) دور بجنستان

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار لرزه‌ای شیب‌های ماسه‌ای خشک مسلح شده با ردیف شمع شناور، تحت اثر بارگذاری‌های لرزه‌ای در جهات مختلف، به کمک روش‌های تحلیل عددی سه بعدی و مدل‌سازی فیزیکی، مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی عددی بزرگ-مقیاس، در مقیاس پروتوتایپ و برای شمع‌های با مقطع دایروی و از جنس بتنی انجام شده است. همچنین مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی کوچک-مقیاس، مجدداً جهت صحت‌سنجی نتایج، در مقیاس مدل، به کمک کاربرد میز لرزه اجرا شده است. اثر بارگذاری‌های زلزله، به شکل اعمال ترکیبات جهتی مختلف بار لرزه‌ای زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، برای رسیدن به پاسخ‌های مختلف سازه‌ای و ژئوتکنیکی، مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج کلی حاصل از این مطالعه، به شرح موارد زیر می‌تواند ذکر گردد:

۱- مسلح کردن شیب با ردیف شمع شناور، تحت اثر ترکیبات بارگذاری لرزه‌ای در جهات مختلف، در زلزله‌های قوی حوزه نزدیک، باعث کاهش چشمگیر در تغییر شکل‌های افقی شیب شده (تا حدود ۵۰٪)، حال آن که در زلزله‌های ضعیف حوزه دور، تأثیر چندانی بر کنترل و کاهش تغییر شکل شیب ندارد.

- Gazetas G, Dakoulas P, "Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1992, 11, 27-61.
- Iai S, "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field", *Soils and Foundations*, 1989, 1 (29), 105-118.
- Itasca, *FLAC^{3D}*, "Fast Lagrangian analysis of continua", version 3.1, Itasca, 2005.
- Ito T, Matsui T, "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", *Soils Found*, 1975, 15 (4), 43-59.
- Li X, He S, Wu Y, "Seismic displacement of slopes reinforced with piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 2010; 136 (6), 880-4.
- Muthukkumaran, K, "Effect of slope and loading direction on laterally loaded piles in cohesionless soil", *International Journal of Geomechanics*, 2013, 1-24.
- Muthukkumaran K, Sundaravadivelu R, Gandhi SR, "Effect of slope on p-y curves Due to surcharge load", *Journal of soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 2008, 48 (3), 353-361.
- Newmark NM, "Effect of earthquakes on dams and embankments", *Géotechnique*, 1965, 15 (2), 139-59.
- Nian TK, Jiang JC, Wang FW, Yang Q, Luan MT, "Seismic stability analysis of slope reinforced with a row of piles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 84, 83-93.
- PEER, "strong ground motion database", ver. 2017. <http://peer.berkeley.edu>
- Wolf JP, "Dynamic soil-structure interaction", New Jersey: Prentice-Hall; 1985.
- Yu YZ, Deng LJ, Sun X, et al, "Centrifuge modeling of dynamic behavior of pile-reinforced slopes during earthquakes", *Journal of Central South University of Technology*, 2010, 17 (6), 1070-78.

EXTENDED ABSTRACT

Numerical-Physical Modeling of the Effect of Direction of Earthquake Loading on the Seismic Interaction of Slope-Floating Pile Row

Hassan Sharafi ^{a,*}, Yazdan Shams Maleki ^b

^a Faculty of Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

^b Civil Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 19 December 2017; **Accepted:** 15 July 2018

Keywords:

Pile; dry sandy slope; seismic loading; numerical model; physical model.

1. Introduction

Using piles row is a well-known method to stabilize the soil slopes in both static and seismic conditions. The load transfer mechanism of installed piles row may be as end-bearing or floating. In this study the behavior of floating piles row with circular cross-section were installed inside the dry sandy slope by help of three-dimensional numerical analyses and physical modeling have been simultaneously studied. The three-dimensional numerical modeling was used for conducting the parametric studies about the effects of directions of imposition of near-field and far-field earthquakes loading on the main structural and geotechnical interaction parameters of floating piles row-sandy slope problem (Al-Defae and Knappett, 2015; Ashour and Ardalan, 2012).

2. Methodology

The seismic loading of near-field and far-field earthquakes records in the form of seismic motions in the in-plane and out-of-plane directions along the longitudinal, transverse and vertical directions were imposed on the slope numerical model. The 3D finite difference method was used for numerical modeling of the main problem (Fig. 1). Moreover, the physical modeling of the investigating problem was implemented for validation of numerical results by imposing the sinusoidal harmonic loading in the longitudinal and transverse horizontal directions of micro-scale slope model by help of small-scale geotechnical shaking table (Fig. 2).

Here, seven seismic loading combinations including L, LT, LTV, LV, T, TV, and V combinations were considered to involve the effects of loading directions into the main problem. The center-to-center distances between adjacent piles in a row plays an important role in creating profitable phenomena such as *soil arching* between piles or *stress transfer* from sandy soil to the piles rigid elements. This distance was considered equal to $2.5d_p$ (d_p : pile diameter) for large-scale parametric numerical models (Fig. 1).

The numerical models of small-scale physical model of shaking table were conducted in the *model scale*. In the other word, the simulation of physical models in numerical modeling was obtained without considering the 1.g shaking table *scale* factors because the scale of physical models is very small (i.e., 1:100). The acceleration and displacement responses of the both large-scale numerical models and small-scale physical models are the main obtained responses in the present work. In the large-scale parametric numerical analyses both near-fault and far-field records of Tabas earthquake in Tabas (near-fault) and Bajestan (far-field) stations, were used. In the small-scale physical models the harmonic sinusoidal excitation was used to simulate the seismic loading in the piles row-sandy slope models. The center-to-center distance between aluminum model piles in physical models due to the physical models implementation difficulties was considered as a larger distance equal to $3.5d_p$.

* Corresponding Author

E-mail addresses: h_sharafi@razi.ac.ir (Hassan Sharafi), yazdan_12507@yahoo.com (Yazdan Shams Maleki).

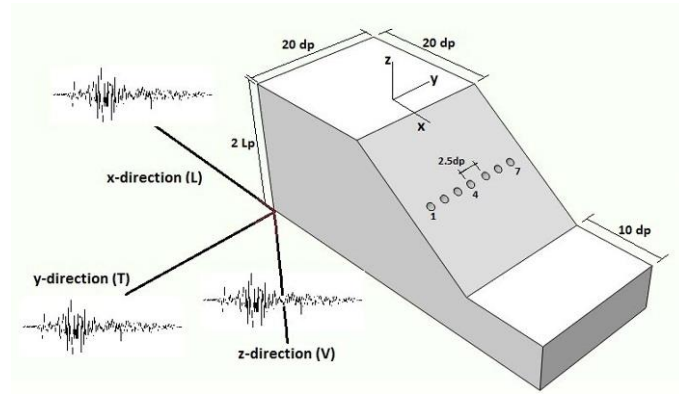


Fig. 1. The overall geometry of the studied problem including piles locations, large-scale numerical model dimensions and directions of triaxial seismic loading

3. Results and discussion

Reinforcing of a dry sandy slope by a row of floating piles (similar to reinforcing of slope by end-bearing piles row) in the strong near-field ground motions results in significant decrease (to about 50 percent) in slope's horizontal displacements while in the weak far-field earthquakes does not have significant effect on the control and reduce of slope displacements. Out-of-plane components of seismic loading such as transverse component of earthquake, T component, (productive of horizontal shear waves, i.e., SH waves) also in the presence of site's effects such as directivity effects can produce the responses as large as the in-plane motion components such as earthquake longitudinal component combinations, L (productive of P and SV seismic waves). In the present study, the results of the small-scale physical models (with a 1:100 scale factor) were considered to verify the large-scale numerical models findings (i.e., to confirm the results in prototype scale). As can be seen in Fig. 2 the results of small-scale physical modeling before and after LT seismic loading (i.e., biaxial seismic loading) were shown. By increasing the seismic loading directions from common uniaxial direction to two and triaxial directions the amounts of slope lateral displacements were increased.

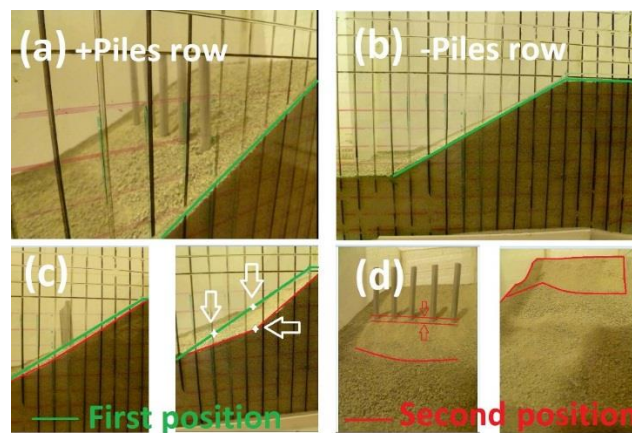


Fig. 2. Small-scale physical model of dry sandy slope: (a) reinforced; (b) unreinforced; (c, d) slope locations with and without reinforcement after base LT seismic lading

4. Conclusions

The motion of slope sliding wedge in the near-field earthquake under effect of *multidirectional seismic loadings* is a rigid block motion while the failure wedge displacement under far-field earthquake record is a negligible motion and occurs in a flexible block manner. The shape of time-history seismic function that shows *energy content* of an earthquake such as Arias intensity or energy flux (i.e., specific energy density: SED) are directly similar to the time-history permanent displacement resulted charts (horizontal or vertical displacements) of the reinforced slopes by a row of floating piles that have been loaded by these records. The depth-depended shape's template (pattern) of bending moment curves for near-field earthquakes is a constant template (i.e., one-summit template) and for far-field earthquakes have another distinct template (two-summits template).

According to the results of the present study in the real seismic loading including soil-pile interaction (SPI) by considering the effects of loading directions the far-field earthquakes records responses contain the small *permanent* displacements with a cyclic and synchronized or asynchronous trend with respect to the input bedrock motion. While the near-field earthquake records produce the obvious *permanent displacements* without cyclic and synchronized or asynchronous trends with respect to initial input motions. Therefore, in the bending moment time-history outputs graphs of piles installed in a dry sandy slope under the near-field earthquake loading both monotonic (i.e. kinematic dynamic interactions) and cyclic (i.e. inertial dynamic interactions) behaviors can be observed. The results of small-scale geotechnical shaking table physical model were used to verify of the obtained 3D numerical results. There is a good agreement between the numerical and physical models results.

5. References

- Al-Defae AH, Knappett JA, "Newmark sliding block model for pile-reinforced slopes under earthquake loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 75, 265-278.
- Ashour M, Ardalan H, "Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction", *Computers and Geotechnics*, 2012, 39, 85-97.