

مدل سازی عددی رفتار شمع - ماسه روانگرا در زلزله حوزه نزدیک

سعید عباسی کرافشانی (دانشجوی دکتری)

رضا پورحسینی اردکانی* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۲ (۱۳۷-۱۳۶، ۱۳۶-۱۳۷، ۱۳۶-۱۳۷)
دوری ۳۹، شماره ۴، صص. ۱۳۶-۱۳۷ (پنداشت شنی)

در تحقیق حاضر اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی پاسخ لرزه‌ای یک سیستم خاک - شمع مورد بررسی قرار گرفته است. اثر جهت‌داری پیش‌رونده، که در ابتدای تاریخچه زمانی سرعت حرکت زمین مشاهده می‌شود و انرژی زیادی را اعمال می‌کند، مخرب‌ترین اثر حرکات زمین در نزدیک گسل است. برای بررسی اثرات حوزه نزدیک، یک مدل سه‌بعدی که شامل خاک دولایه، لایه سست بر روی لایه متراکم، و شمع، در نظر گرفته شده است. مدل سازی با استفاده از نرم‌افزار ۳D FLAC انجام شده است. مدل رفتاری P2PSand که یک مدل پلاستیسیته دوسطحی حالت بحرانی است، برای مدل سازی روانگرایی خاک ماسه‌ای بکار گرفته شد. چهار رکورد حوزه نزدیک، ثبت شده بر روی سنگ، به مدل مورد نظر اعمال شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که پالس سرعت حوزه نزدیک اثر قابل توجهی بر روی رفتار سیستم دارد و زمینه‌ی تغییر مکان ناگهانی بزرگ بر روی خاک و شمع ایجاد می‌کنند. پالس موجود در رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک، باعث شده است در مدت زمان اعمال آن ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru) افزایش یافته و روانگرایی در لایه‌ی خاک بالایی ایجاد شود.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک-شمع، پاسخ لرزه‌ای، پالس سرعت، روانگرایی، ۳D-FLAC.

۱. مقدمه

هنگام زلزله‌های شدید شود که منجر به آسیب به شمع و شکست سازه پی شمع می‌شود.^[۵-۳] مطالعات متعددی در زمینه بررسی رفتار شمع در خاک روانگرا انجام شده‌اند. این مطالعات شامل آزمایش سه‌محوری^[۶]، آزمایش‌های سانتریفیوژ^[۷-۸]، آزمایش‌های میز لرزه^[۹-۱۰]، آزمایش‌های در محل^[۱۱] و مطالعات تحلیلی و عددی مختلف^[۱۲، ۱۳] می‌باشند. این مطالعات عمدتاً بر تأثیر ویژگی‌های شمع و خاک و مکانیزم‌های مرتبط بر عملکرد آن‌ها متمرکز شده‌اند.

در زمین لرزه‌های شدید اخیر، حرکات زمین در نزدیکی گسل‌ها که از ایستگاه‌هایی در فاصله ۲۰ کیلومتری یک گسل ثبت شده‌اند، ویژگی‌های منحصر به فردی را نشان می‌دهند که با حرکات زمین دور از گسل متفاوت هستند.^[۱۴] این ویژگی‌ها شامل تاریخچه‌های زمانی سرعت و جابه‌جایی برای حرکات زمین با پالس‌های دارای دوره تناوب طولانی و دامنه‌های بالا به‌عنوان ویژگی‌های خاص زلزله‌های نزدیک گسل عنوان شده‌اند^[۱۵] که با حرکات معمولی حوزه دور متفاوت هستند. از مهمترین ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک می‌توان به اثرات جهت‌داری^۳ و حرکت پرتابی^۴ اشاره کرد.^[۱۶] زلزله‌های حوزه نزدیک دو ویژگی مهم دارند که عبارتند

در زلزله‌های شدید، گسترش اضافه فشار آب حفره‌ای در ماسه‌های اشباع با تراکم سست تا متوسط می‌تواند موجب روانگرایی شود. روانگرایی انواع مختلفی دارد که دو نوع اصلی آن روانگرایی جریانی^۱ و نرم‌شوندگی تناوبی^۲ می‌باشند. این دو نوع روانگرایی می‌توانند تغییر شکل‌های بسیار بزرگی را به وجود آورند. یکی از راهکارهای مقابله با مشکل روانگرایی، استفاده از پی شمعی در این نوع خاک‌ها است. با این حال، روانگرایی یکی از دلایل عمده خسارت‌های رخ داده در پی‌های شمعی طی زلزله‌هایی مانند نیگاتا (۱۹۶۴)، آلاسکا (۱۹۶۴)، لوما - پریتا (۱۹۹۵)، کوبه (۱۹۹۵)، بوج (۲۰۰۱)، ساماترا (۲۰۰۴)، موله (۲۰۱۰) و هایتی (۲۰۱۰) بوده است. مکانیسم‌های متفاوت خسارت در پی‌های شمعی به شکل‌هایی مانند تغییر شکل‌های شدید، خرابی‌های سازه‌ای مانند کمانش، شکست خمشی و برشی و یا نشست شدید، مشاهده شده‌اند.^[۱۷] کاهش مقاومت و سختی خاک در اثر روانگرایی ممکن است باعث ایجاد نیروی برشی و لنگر خمشی قابل توجهی در شمع‌ها در

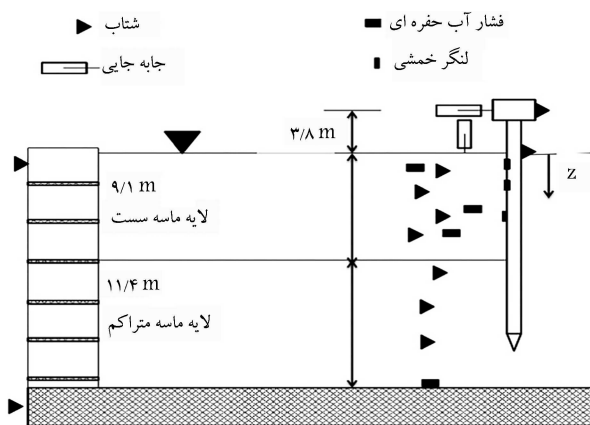
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۱۰، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱/۲۹، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۰.

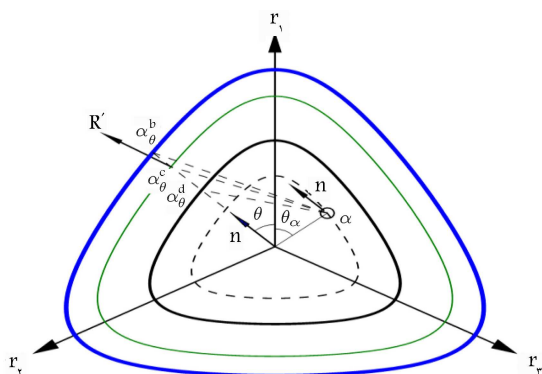
استاد به این مقاله:

عباسی کرافشانی، سعید و پورحسینی اردکانی، رضا، ۱۴۰۲. مدل سازی عددی رفتار شمع - ماسه روانگرا در زلزله حوزه نزدیک. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۱۳۷-۱۳۶.

DOI:10.24200/J30.2023.61572.3186



شکل ۱. مشخصات مدل عددی در نظر گرفته شده. [۲۶]



شکل ۲. نمایش مدل P2PSand در صفحه π .

عنوان ابعاد مستطی برگزیده شده است. سنگ بستر در کف مدل فرض شده است.

۱.۲. مدل رفتاری P2PSand

مدل رفتاری P2PSand [۲۸] یک مدل پلاستیسیته دو سطحی حالت بحرانی برای کاربرد در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای با هدف در نظر گرفتن ویژگی‌های دینامیکی خاک توسعه یافته است. این مدل یک مدل توسعه یافته و اصلاح شده از مدل DM^{۰۴} است که توسط دافالیاس و منظری توسعه یافته است. [۲۹] با اصلاح برخی از روابط بدون افزودن پیچیدگی زیاد، عملکرد مدل بهبود یافته است و تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده در مدل‌های عددی و مشاهدات آزمایشگاهی یا میدانی و روابط تجربی با شرایط اولیه و بارگذاری مختلف وجود دارد. [۲۹] در مدل اصلاح شده، به جای مربوط کردن روابط به نسبت تخلخل (e)، از مقادیر تراکم نسبی (D_r) استفاده شده است. این کار باعث شده تا برای کالیبره کردن مدل بتوان از داده‌های آزمایش‌های برجا مانند تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد (N_1) به جای داده‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. این مدل از فرمول کلی چند محوری مدل DM^{۰۴} پیروی می‌کند و بنابراین می‌تواند برای مسائل سطح مرزی سه بعدی عمومی استفاده شود. همچنین، این مدل به صورت ثابت به نرم‌افزار اضافه شده است و نیاز به نصب افزونه‌های دیگر و کدنویسی اضافه ندارد. نمایش شماتیک مدل P2PSand در صفحه π در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص شده است، چهار سطح برای مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود که به ترتیب شامل سطح مرزی، حالت بحرانی، اتساع و تسلیم هستند. کوچکترین سطح مربوط به سطح تسلیم بوده و بزرگترین سطح مربوط به سطح مرزی است.

از: اثر جهت‌پذیری که به مکانیزم گسیختگی و جهت گسترش گسلش وابسته است و دیگری اثر حرکت پرتابی که به علت تغییر شکل دائمی ناشی از لغزش گسل به وجود می‌آید و پالس‌های سرعت یک‌طرفه ایجاد می‌کند. جهت‌پذیری شامل دو نوع پیش‌رونده و پس‌رونده می‌باشد. زمانی که جبهه گسیختگی گسل با سرعتی نزدیک به سرعت امواج برشی در سنگ به سمت سایت مورد نظر انتشار پیدا می‌کند، پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده رخ می‌دهد و باعث می‌شود که قسمت بزرگی از انرژی لرزه‌ای ناشی از شکست به صورت یک پالس سرعت قوی با زمان تناوب بلند در زمان کمی بعد از شروع زلزله به سایت مورد نظر اعمال شود. [۱۷] به طور کلی، پالس‌های سرعت ناشی از پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده به صورت دوطرفه می‌باشند. این پالس‌های سرعت دوطرفه که در مولفه عمود بر گسل زلزله‌های حوزه نزدیک مشاهده می‌شوند، مخرب‌تر از پالس‌های یک‌طرفه ناشی از حرکت پرتابی می‌باشند. مطالعات انجام شده توسط محققین نشان می‌دهد که جهت‌پذیری پیش‌رونده مهمترین عامل خرابی در سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل است. [۱۸، ۱۶]

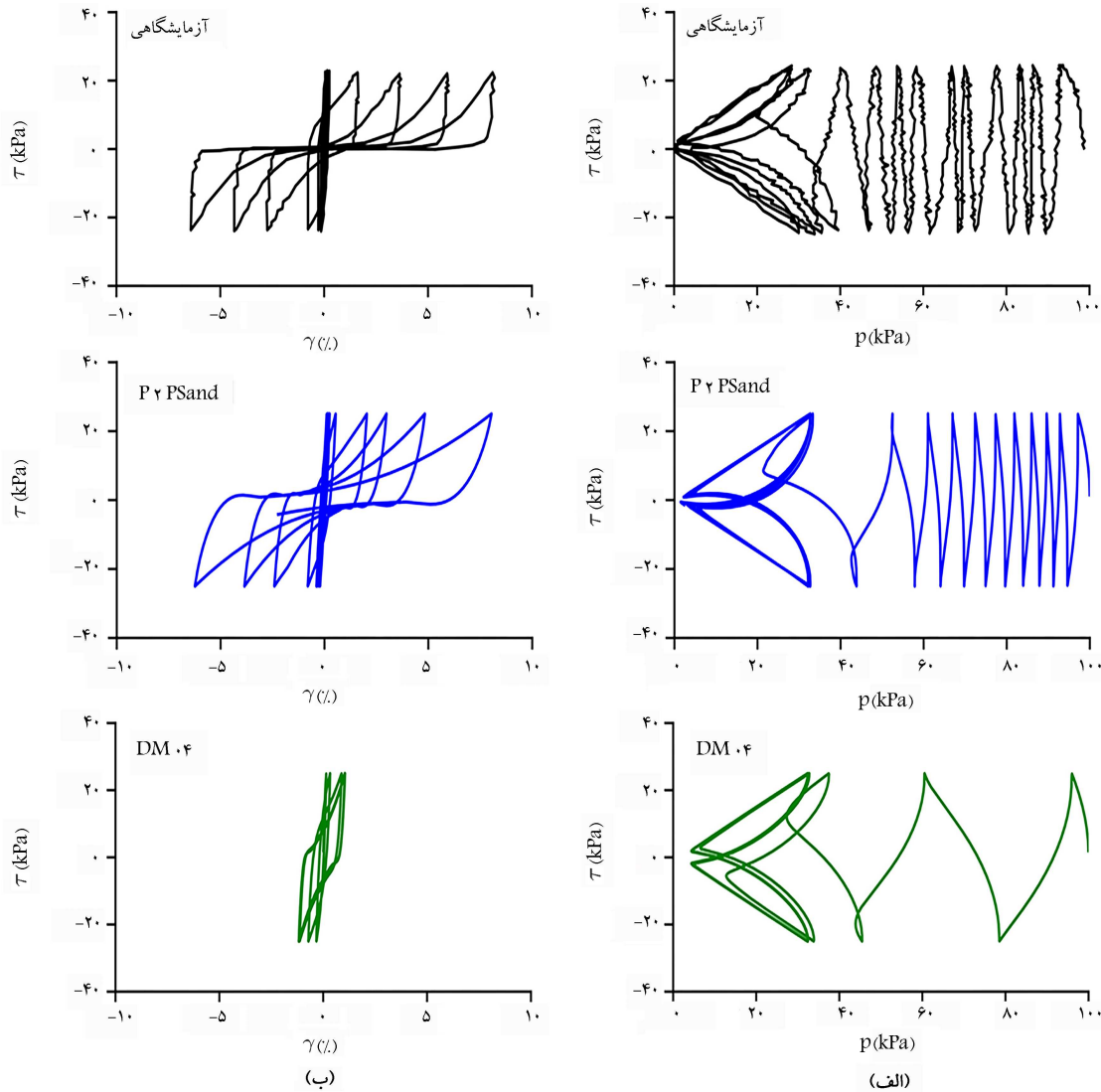
تحقیقات زیادی برای بررسی تأثیر ویژگی‌های حرکت زمین نزدیک گسل بر روی پل‌ها، سازه‌ها و سدها انجام شده است. [۱۹-۲۱] اثر حرکات حوزه نزدیک و دور ناشی از زمین‌لرزه بر روی یک سد خاکی توسط داودی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. [۲۲] نتایج این تحقیق نشان داد که جابه‌جایی و نشست در حرکات حوزه نزدیک، بیشتر از حرکات حوزه دور است. سعیدی و همکاران، تأثیر خواص شمع و خاک مانند فرکانس غالب زلزله، سختی شمع و دانسیته نسبی خاک را بر پاسخ دینامیکی شمع در خاک روانگر بررسی کردند. [۲۳] سرکار و همکاران، پاسخ شمع در خاک روانگر را تحت اثر حرکات مختلف زمین بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر نیروی ایجاد شده در شمع در مقادیر خاصی از ضریب فشار آب حفره‌ای (R_u) اعمال می‌شود. [۲۴] در این تحقیق، با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی با نرم‌افزار ۳D FLAC و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - شمع، به بررسی اثر پالس‌های ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک بر پاسخ شمع در خاک روانگر پرداخته شده است. لازم به ذکر است که اثر پالس به دلیل اعمال انرژی زیاد در مدت زمان کم دارای اهمیت زیادی است.

۲. مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی با استفاده از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار ۳D FLAC نسخه ۷.۰.۱۴۲ انجام شد. [۲۵] مدل عددی در نظر گرفته شده شامل دو بخش خاک و شمع است که در آزمایش مدل سانتریفیوژ شماره ۱ از پروژه VELACS، انجام شده توسط ویلسون [۲۶]، استفاده شده است. مشخصات و ابعاد مربوط به مدل عددی در نظر گرفته شده در شکل ۱ ارائه شده‌اند. در این آزمایشات، مشخصات خاک شامل دو لایه افقی از شن و ماسه اشباع نوادا است. در مقیاس نمونه اولیه، لایه زیرین دارای ضخامت ۱۱/۴ متر، با تراکم نسبی ۸۰ درصد (متراکم) است، در حالی که لایه بالایی دارای ضخامت ۹/۸ متر، با تراکم نسبی ۳۵ درصد (شل) است. از یک شمع فولادی لوله‌ای با قطر خارجی ۶۷۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است. نوک شمع حدود ۳/۸ متر بالاتر از پایین ظرف قرار دارد. وزن روسازه برابر ۴۹۱ کیلو نیوتن است. ابعاد مدل (از هر طرف به طول ۲۵ متر) به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا مرزها تحت تأثیر تنش قرار نگیرند. در این راستا، ابعاد در نظر گرفته شده در تحقیق ویلسون [۲۷] به

جدول ۱. مقایسه روابط دو مدل P۲Psand و DM۰۴ [۲۸]

عملکرد پارامتر	مدل P۲Psand	مدل DM۰۴
الاستیک	$G = G_r p_{atm} (\frac{p}{p_{atm}})^{0.5}$	$G = G_r \frac{(1.94V - e)^2}{1 + e} p_{atm} (\frac{p}{p_{atm}})^{0.5}$
پارامتر حالت	$I_R = -D_r \ln IP$	$\psi = e - e_c$
تابع تسلیم		$f = [(s - p\alpha) : (s - p\alpha)]^{0.5} - \sqrt{2/3} pm$
سطح مرزی	$M_b = M^c \exp(n_b I_R)$	$M_b = M^c \exp(n_b (-\psi))$
سطح اتساع	$M_b = M^c \exp(-n_b I_R)$	$M_b = M^c \exp(n_b \psi)$



شکل ۳. مقایسه نتایج آزمایش استوانه توخالی پیچشی برای مدل‌های DM۰۴ و P۲Psand و نتایج آزمایشگاهی [۲۸]

را به آن اختصاص داد. مقدار φ_{cs} نشان دهنده زاویه اصطکاک در حالت بحرانی است. g_0 و C_{Dr} ضرایبی هستند که در محاسبات حالت الاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. رابطه ۱ نشان دهنده رابطه حالت بحرانی مدل P۲Psand است که ضرایب D_{rc} ، λ_c ، ξ به عنوان ضرایب ثابت برای محاسبات آن استفاده می‌شوند.

$$D_{rc} = D_{rc0} + \lambda_c (P_c / P_{atm})^\xi \quad (1)$$

مقادیر مربوط به حداقل و حداکثر نسبت تخلخل نیز در این جدول ارائه شده‌اند.

در جدول ۱ مقایسه بین معادلات مدل‌های DM۰۴ و P۲Psand انجام شده است. [۲۸] در شکل ۳ مقایسه نتایج استفاده از مدل‌های DM۰۴ و P۲Psand برای مدل‌سازی آزمایش استوانه توخالی پیچشی^۵ نشان داده شده است. [۲۸] همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج مدل P۲Psand نزدیک به نتایج آزمایشگاهی است.

پارامترهای مربوط به این مدل برای خاک نوا در جدول ۲ ارائه شده‌اند. [۲۸] با توجه به لایه‌بندی مختلف خاک، می‌توان به راحتی تراکم نسبی مربوط به هر لایه

جدول ۲. مشخصات مربوط به پارامترهای مدل رفتاری. [۳۰، ۲۸]

پارامتر		
عملکرد	نشانه	مقدار
زاویه اصطکاک بحرانی	φ_{cs}	۳۰/۱
پارامترهای الاستیک	g_0	۱۵°
	C_{Dr}	۱/۶۲
پارامترهای حالت بحرانی	D_{r0}	۰/۱۸
	λ_c	۰/۰۵۷
حداقل نسبت تخلخل	ξ	۰/۲۷
	e_{min}	۰/۵۱۱
حداکثر نسبت تخلخل	e_{max}	۰/۸۸۷

جدول ۳. مشخصات ماسه نوادا برای تحلیل عددی. [۳۱، ۲۶]

پارامتر	ماسه نوادا	
	$Dr = 1\%$	$Dr = 35\%$
نفوذپذیری (m/s)	$3/7 \times 10^{-5}$	$7/05 \times 10^{-5}$
وزن مخصوص اشباع kN/m^3	۱۹/۱۹	۱۹/۱۱
نسبت تخلخل (e)	۰/۵۹۴	۰/۷۴۳

جدول ۴. مشخصات مربوط به فولاد.

پارامتر	جرم مخصوص (kg/m^3)	مدول کشسانی (GPa)	ضریب پواسون
مقدار	۷۸۵۰	۲۰۰	۰/۳

در جدول ۳ اطلاعات مربوط به پارامترهای نفوذپذیری و وزن مخصوص خاک برای لایه بندی مختلف خاک ارائه شده است. این اطلاعات بر اساس تراکم نسبی ۳۵ درصد و ۸۰ درصد مطابق با لایه بندی در نظر گرفته شده در مدل سازی ارائه شده اند. شمع از جنس فولاد در نظر گرفته شده است. مشخصات مربوط به فولاد در نظر گرفته شده در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که رفتار فولاد به صورت الاستیک فرض می شود.

اندرکنش میان شمع و خاک با المان های تماسی در نظر گرفته شده است. در این نوع تماس، زمانی که سطوح در تماس با یکدیگر قرار می گیرند، هر گونه فشار تماسی میان آن ها منتقل می شود. در مدل سازی امکان جداشدگی بین خاک و شمع در نظر گرفته شده است. اگر این فشار تماسی به صفر برسد، سطوح از یکدیگر جدا می شوند. در واقعیت زمانی که شمع تحت بارگذاری جانبی قرار می گیرد، ممکن است میان شمع و خاک فاصله ایجاد شود. اگر جهت بارگذاری جانبی معکوس شود، تا زمانی که درز بین شمع و خاک پر نشده باشد، نیرویی از طرف خاک به شمع وارد نخواهد شد.

۲.۲. شرایط مرزی و بارگذاری

در مدل سازی، کف مدل به عنوان سطح سنگ بستر در نظر گرفته شده است و در سه جهت x، y و z مقید می شود (درجات آزادی بسته می شوند). همچنین، مرزهای جانبی نیز در جهت عمود بر آن مقید می شوند. در تحلیل دینامیکی در صورت مقید کردن مرزهای جانبی، به دلیل انتشار امواج زلزله در محیط خاک، با برخورد

امواج به مرز و منعکس شدن آن ها به داخل محیط در تحلیل، خطا ایجاد می شود. به همین دلیل، محققان معمولاً در دیواره ها برای جلوگیری از ایجاد خطا از مرزهای جاذب استفاده می کنند. در این تحقیق مرزهای جانبی انتخاب شده از نوع مرز آزاد^۶ هستند. در مطالعه انجام شده توسط Baker، تعداد ۹۱ رکورد مربوط به زلزله های حوزه نزدیک که دارای پالس ناشی از جهت داری پیش رونده در تاریخچه زمانی سرعت حرکت زمین هستند، معرفی شده اند.^[۱۴] در این مطالعه، از یک روش مبتنی بر استفاده از تبدیل Wavelet برای به دست آوردن مقادیر پرپود پالس رکوردها (T_p) استفاده شده است. با توجه به فرضیات مسئله که محل اعمال شتابنگاشت ها روی سنگ بستر فرض شده است، تعداد ۴ شتابنگاشت ثبت شده روی سنگ سخت از میان این ۹۱ رکورد، جهت انجام تحلیل ها انتخاب شده اند. مشخصات این شتابنگاشت ها در جدول ۵ ارائه شده اند. جهت استفاده از این شتابنگاشت ها، هر یک از آن ها به شتاب حداکثر $0.35g$ مقیاس شده اند.

۳.۲. مراحل حل

مراحل کلی حل مسئله به صورت زیر در نظر گرفته شده است: در گام اول، خاک به صورت الاستیک در نظر گرفته شده تا تنش های اولیه در مدل ایجاد گردند. این شرایط در دو مرحله اعمال می شوند. در مرحله اول خاک به صورت خشک در نظر گرفته می شود. همچنین، در این مرحله، مقادیر مقاومتی خاک بسیار زیاد در نظر گرفته می شود تا در زمان اعمال جاذبه به مدل به آن شوک وارد نشود. در مرحله بعدی، خاک با مدل موهرکولمب با پارامترهای مقاومتی (چسبندگی و اصطکاک) واقعی تحلیل می شود تا تنش های اولیه در مدل ایجاد شوند.

در گام دوم، به منظور ایجاد فشار آب حفره ای و اضافه کردن اثر آب به مدل، ابتدا یک تحلیل جریان^۷ انجام می شود. این تحلیل در حالتی انجام می شود که حل مکانیکی غیرفعال است.^۸ در این مرحله مشخصات مربوط به نفوذپذیری و تخلخل اولیه خاک به مدل اعمال می شود. در پایان تحلیل جریان، فشار آب به صورت خودکار در تمام مدل محاسبه و اعمال می شود. در گام سوم، به منظور اعمال تغییرات تنش موثر ناشی از تغییرات فشار آب انجام خواهد شد. در این مرحله و بر خلاف گام دوم، تحلیل به صورت مکانیکی فعال خواهد بود^۹، در صورتی که حل جریان غیرفعال می شود^{۱۰}. پس از انجام این مرحله، تنش های موثر در مدل به صورت صحیح محاسبه و اعمال خواهد شد. در گام چهارم، مدل رفتاری به مدل رفتاری PYPsand تغییر می یابد. در این مرحله نیز حل به صورت مکانیکی انجام می شود. پس از پایان این مرحله، مدل آماده ی تحلیل دینامیکی است. در گام پنجم، مدل تحت بارهای دینامیکی مختلف تحلیل می شود. در این مرحله، ابتدا مرزهای آزاد فعال می شوند. بار دینامیکی هر زلزله به صورت نگاشت سرعت به مرزهای اطراف و کف مدل اعمال می شود. نفوذپذیری خاک ها در حین وقوع زلزله و روانگرایی تغییر می کنند. شهیر و همکاران، یک مدل ریاضی برای بیان تغییرات نفوذپذیری خاک در پدیده روانگرایی، از شروع لرزش تا پایان زوال اضافه فشار آب حفره ای معرفی کردند.^[۳۲] این مدل، نفوذپذیری را بر اساس نسبت اضافه فشار آب حفره ای به تنش قائم موثر اولیه ($Ru = \Delta u / \sigma_0$) بیان می کند. در این مدل فرض می شود که با شروع لرزش و تا رسیدن به مقدار $Ru = 1$ ، نفوذپذیری افزایش یافته و تا هنگامی که $Ru = 1$ باشد، نفوذپذیری ثابت می ماند و با آغاز زوال اضافه فشار آب حفره ای، کاهش نفوذپذیری نیز کاهش می یابد. در هنگام تحلیل مدل، تغییرات نفوذپذیری طبق مدل شهیر و همکاران در نظر گرفته شده است.^[۳۲] میرایی اعمال شده به خاک به صورت میرایی رایلی در نظر گرفته شده است و

جدول ۵. شتابنگاشت‌های انتخاب شده. [۱۴]

ردیف	زلزله	$T_p(s)$	$PGV(cm/s)$
۱	Coyote Lake(Gilroy Array #۶)	۱/۲	۵۱/۵
۲	Northridge-۰ ۱ (Pacoima Dam (downstream))	۰/۵	۵۰/۴
۳	Northridge-۰ ۱ (Pacoima Dam (upper left))	۰/۹	۱۰۷/۱
۴	Kocaeli, Turkey (Gebze)	۵/۹	۵۲

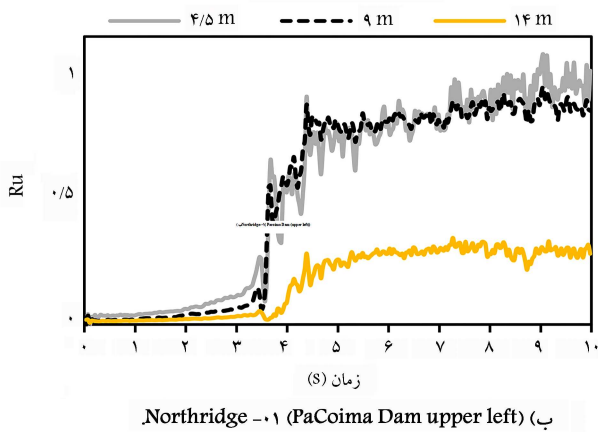
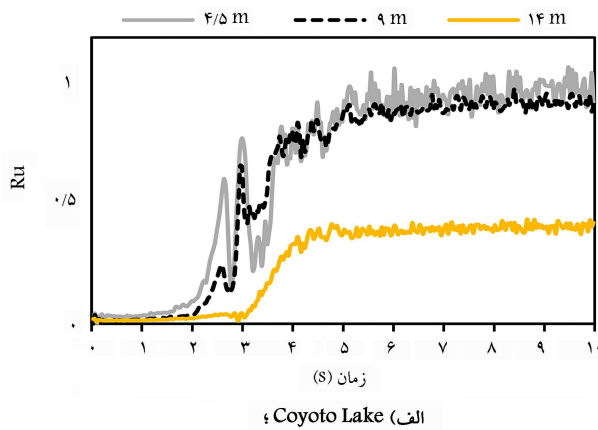
تطابق خوبی میان نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایش سائتریفیوژ وجود دارد.

۳. تحلیل نتایج

پس از ارائه توضیحات مربوط به فرضیات و نحوه‌ی مدل‌سازی، نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها نشان داده خواهد شد. در ابتدا نتایج مربوط به تحلیل رفتار خاک و سپس نتایج مربوط به تحلیل رفتار شمع ارائه می‌شود. با توجه به محدودیت تعداد صفحات، امکان اضافه کردن تمامی نمودارها میسر نبوده و در هر بخش تعداد کافی از نمودارها ارائه شده است.

۱.۳. تحلیل رفتار خاک

در این بخش، رفتار مربوط به خاک در مدل عددی بررسی شده است. شکل ۶

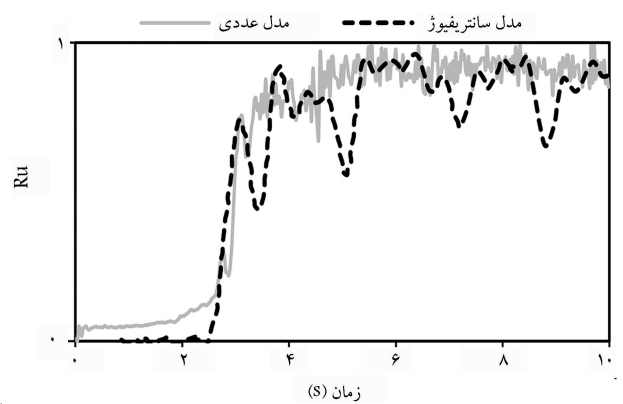
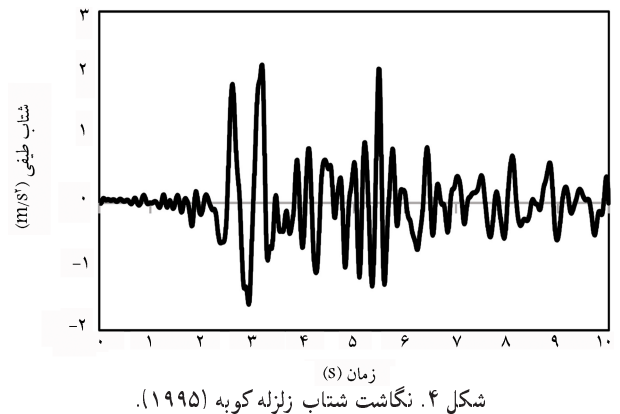


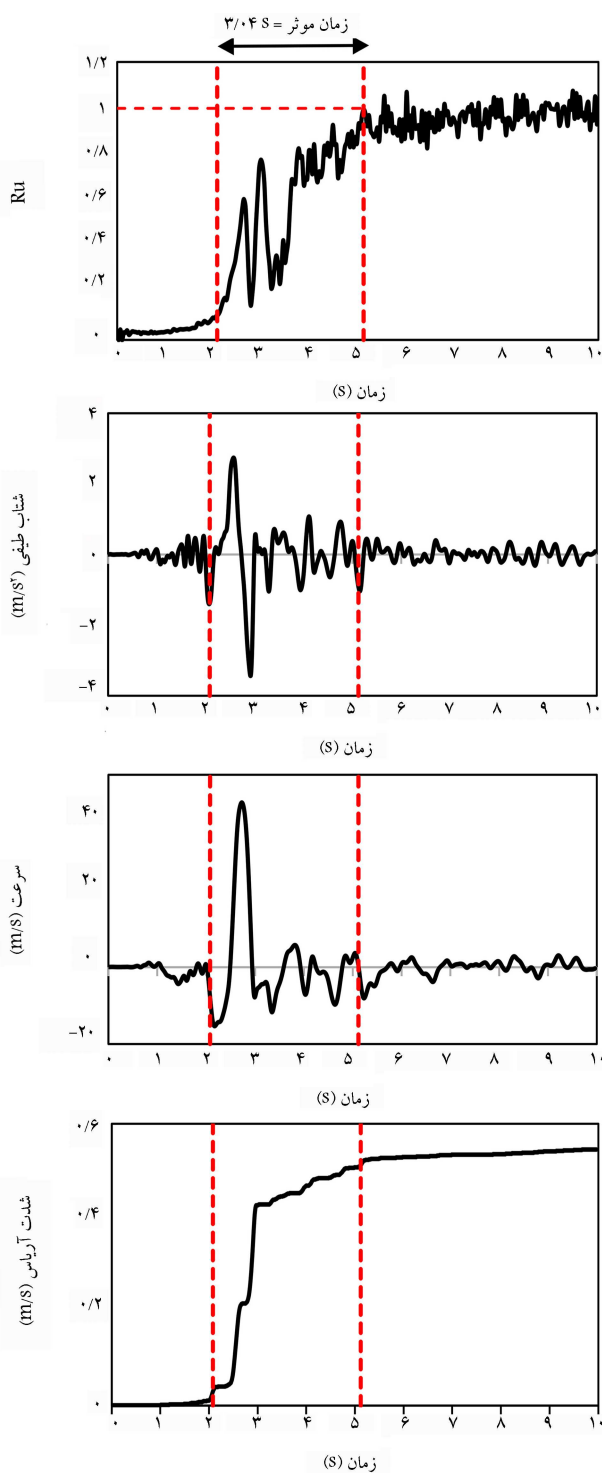
شکل ۶. مقادیر ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru) تحت اثر زلزله‌ها.

فرض بر آن است که نسبت میرایی در زمان تناوب سیستم خاک - شمع و زمان تناوب خاک برابر با ۰/۵ باشد. هر یک از تحلیل‌ها با یک کامپیوتر با پردازش‌گر شش هسته‌ای نسل ۱۰ و ۱۶ گیگابایت رم، بین ۷۰ تا ۱۴۰ ساعت به طول می‌انجامد.

۴.۲. نتایج صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی، از نتایج آزمایش سائتریفیوژ شماره‌ی یک پروژه VELACS، که توسط ویلسون [۲۶] صورت گرفته، استفاده شده است. نگاشت شتاب زلزله کوبه، با مقیاس $0/22g$ (شکل ۴)، به عنوان تحریک ورودی به مدل اعمال می‌شود. مقادیر مربوط به تاریخچه زمانی ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای ($Ru = \Delta u/\sigma_v$) در عمق ۴/۵ متر از سطح زمین در مدل‌سازی عددی، با نتایج به دست آمده از آزمایش سائتریفیوژ مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود،





شکل ۷. مقایسه تاریخچه زمانی مقادیر Ru ، شتاب، سرعت و شدت آریاس تحت اثر زلزله Coyote Lake.

ذرات و تنش برشی در این جهت را می‌توان به ترتیب به صورت معادلات ۲ و ۳ محاسبه کرد: [۲۲]

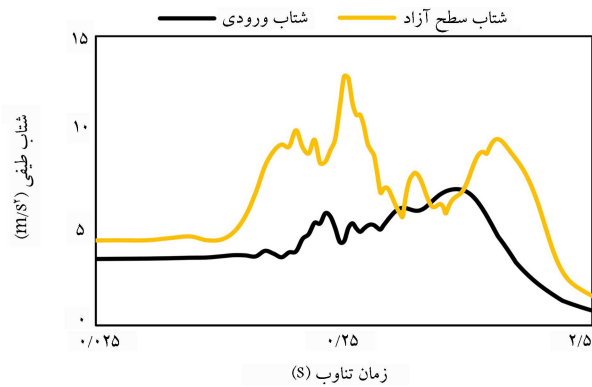
$$v_s = \frac{dw}{dt} = \frac{\varepsilon_{xz} dz}{dt} = \frac{\sigma_{xz} C_s dt}{G} = \frac{\sigma_{xz}}{G} C_s = \frac{\sigma_{xz}}{\rho C_s^2} C_s = \frac{\sigma_{xz}}{\rho C_s} \quad (2)$$

نشان‌دهنده تاریخچه زمانی ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای ($Ru = \Delta u / \sigma'_v$) در اعماق مختلف برای زلزله‌های الف (Coyote Lake) و ب (Northridge) Dam (upper left) است. این نمودارها برای مقادیر Ru در اعماق ۴/۵، ۹ و ۱۴ متر رسم شده است. عمق ۴/۵ متر نشان‌دهنده موقعیت وسط لایه روانگرا (لایه بالایی) و عمق ۹ متر نشان‌دهنده موقعیت مرز دولایه روانگرا و غیرروانگرا هستند. همچنین، عمق ۱۴ متر موقعیت وسط لایه غیرروانگرا (لایه پایینی) را نشان می‌دهد. در این نمودارها نزدیک شدن مقدار Ru به مقدار یک، نشان‌دهنده وقوع روانگرایی است. همانطور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی با افزایش عمق، ضریب Ru کاهش می‌یابد. این اتفاق به دلیل افزایش تنش موثر اولیه با افزایش عمق است که باعث می‌شود مقاومت در برابر روانگرایی بیشتر باشد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در اعماق ۴/۵ و ۹ متر روانگرایی به وقوع پیوسته است، اما در عمق ۱۴ متر، ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای مقداری کمتر از یک دارد و در نتیجه در این لایه روانگرایی ایجاد نشده است. این نتیجه نشان‌دهنده کارایی مناسب پی شمعی است. به بیان دیگر، اگر تمامی طول شمع در لایه خاک بالایی قرار می‌گرفت، قطعاً شمع کارایی مناسب نداشت. اما قرار گرفتن نوک شمع در لایه زیرین، می‌تواند موجب کارایی مناسب شمع شود. البته باید تمامی عوامل موثر بررسی گردند.

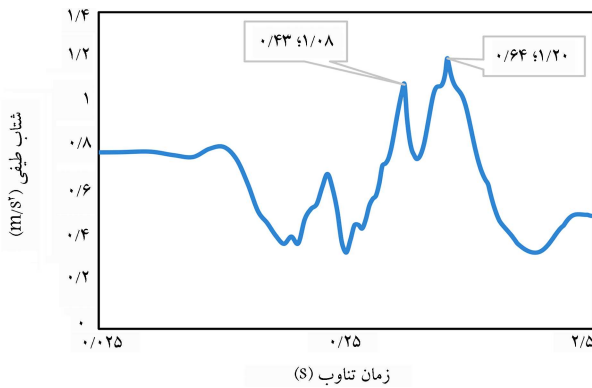
همچنین، در شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که حرکت پالس‌گونه زلزله‌های حوزه نزدیک، که پیش‌تر به آن اشاره شد، در روند تغییر Ru موثر است. به عبارت دیگر، می‌توان این نکته را ذکر کرد که اعمال پالس موجود در رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک در مدل موجب شده است تا در مدت زمان اعمال آن (که زمان کوتاهی است)، ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش یافته و روانگرایی در لایه بالایی ایجاد شود. به همین دلیل، با توجه به مدت زمان اعمال این پالس‌ها، می‌توان رفتارهای متفاوت و با شدت‌های متفاوت را مشاهده کرد.

از آنجایی که تفاوت اصلی بین حرکات زمین نزدیک به گسل و دور از گسل در تاریخچه زمانی سرعت مشخص شده است، بررسی این پارامتر می‌تواند برای بررسی بهتر مسئله مفید باشد. مطالعات محققان نیز اهمیت بررسی اثر حداکثر سرعت ذره را بر رفتار غیرخطی نشان داده‌اند. [۲۳] آن‌ها از این پارامتر برای محاسبه توزیع فاکتور کرنش افقی برای شهر صوفیه استفاده کردند تا مدلی را توسعه دهند که می‌تواند گسیختگی زمین، ارزیابی حساسیت روانگرایی و تغییر شکل غیرخطی خاک در نزدیکی این شهر را پیش‌بینی کند.

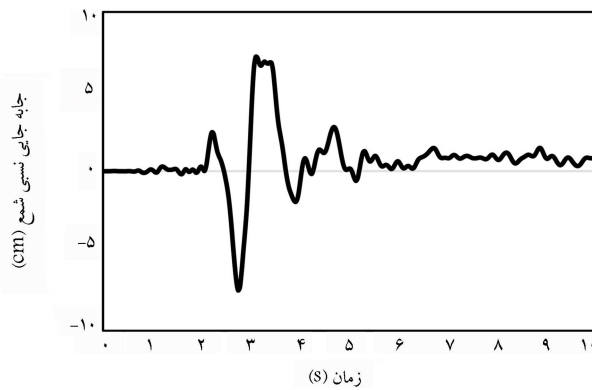
تاریخچه زمانی ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای به دست آمده با تحلیل غیرخطی تحت اثر زلزله Coyote Lake در شکل ۷ ارائه شده است. بزرگترین مقدار ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای زمانی ایجاد شده است که پالس ابتدایی به مدل اعمال شده است. این اثر به دلیل وجود پالس‌های سرعت با دامنه بالا در نگاهت‌های نزدیک به گسل است که باعث اعمال انرژی ناگهانی در مدت زمان کوتاه می‌شود. مدت زمان موثر^{۱۱} و تغییرات کل انرژی ورودی برای هر رکورد نیز در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مدت زمان موثر برای یک حرکت زمین به‌عنوان طول فاصله زمانی بین انباشت ۵ و ۹۵ درصد انرژی حرکت زمین تعریف می‌شود. انرژی حرکت زمین با شدت آریاس^{۱۲} تعریف می‌شود. [۲۴] همچنین، می‌توان از شکل ۷ استنباط کرد که بزرگی انرژی ورودی یا اوج شتاب زمین به تنهایی معیار کاملی برای شدت حرکت زمین نمی‌باشد. به منظور تفسیر نتایج شکل ۷، در نظر گرفتن تعریف تحریک ورودی اهمیت دارد. برای حالت دو بعدی امواج برشی که در صفحه x-y منتشر می‌شوند، جابه‌جایی تنها در جهت افقی در صفحه x-z رخ می‌دهد. سرعت



شکل ۸. طیف پاسخ شبه شتاب متناظر با رکورد Coyote Lake اعمال شده در محل سنگ بستر (شتاب ورودی) و طیف پاسخ شتاب ثبت شده در سطح زمین (شتاب سطح آزاد).



شکل ۹. بررسی تغییرات زمان تناوب اصلی لایه خاک تحت اثر رکورد Coyote Lake.



شکل ۱۰. تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نسبی شمع را برای زلزله Coyote Lake.

۲.۳. تحلیل رفتار شمع

شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نسبی شمع را برای زلزله‌ی Northridge-۰۱ (Pacoima Dam (upper, Coyote Lake (left) و Kocaeli, Turkey (Gebze)) نشان می‌دهد. مقادیر نشان داده شده در نمودار، از تفاضل تغییر مکان افقی نوک و سر شمع به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل وجود پالس سرعت در زلزله‌های حوزه نزدیک، یک تغییر مکان پالس‌گونه در شمع اعمال می‌شود. همچنین، بیشینه جابه‌جایی

$$\sigma_{xz} = 2\rho C_s v_s \quad (3)$$

که در آن w جابه‌جایی افقی در جهت z ، ε_{xz} کرنش برشی، σ_{xz} تنش برشی اعمال شده، ρ چگالی، G مدول برشی، C_s سرعت موج برشی، و v_s تاریخچه زمانی سرعت ورودی هستند.

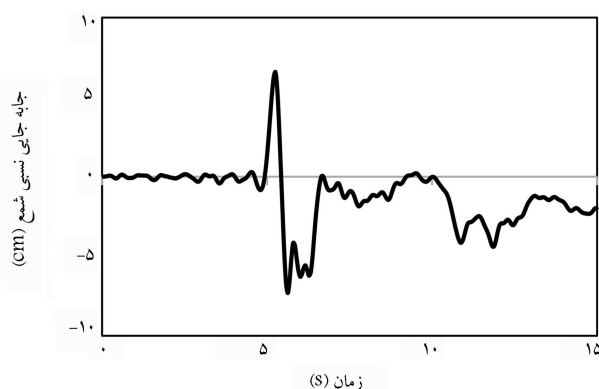
باید توجه داشت که اگرچه مفاهیم معادله ۲ و ۳ از نظر تئوری تنها برای رفتار خطی صحیح هستند، آن‌ها به صورت تجربی مشاهده شده‌اند تا نامی بهتر در مورد رفتار غیرخطی مانند روانگرایی ارائه دهند.^[۳۳] بر اساس معادله ۳، یک رکورد سرعت را می‌توان به رکورد تنش تبدیل کرد و به یک مرز آرام اعمال کرد. این معادله نشان می‌دهد که تاریخچه زمانی تنش برشی ورودی، رابطه مستقیمی با سرعت دارد و رابطه مستقیمی با شتاب یا جابه‌جایی ندارد. این پدیده یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کلیدی حرکات زمین نزدیک به گسل است که جابه‌جایی غیرالاستیک بزرگتری نسبت به حرکات دور از گسل ایجاد می‌کنند. یکی دیگر از تفاوت‌هایی که معمولاً میان زلزله‌های حوزه نزدیک و دور وجود دارد، اختلاف در نسبت بیشینه سرعت زمین^{۱۳} به بیشینه شتاب زمین^{۱۴} (PGV/PGA) است. معمولاً این نسبت برای زلزله‌های حوزه نزدیک بزرگتر از حوزه دور است و مقدار آن اثر پدیده جهت‌داری را در نگاشت نشان می‌دهد. به طور کلی، این ویژگی منجر به سطح تنش برشی بیشتر می‌شود. این امر باعث می‌شود تا رفتار مصالح به سطح تسلیم برسد. در این شرایط، مصالح ممکن است دچار تغییر شکل پلاستیک شوند.^[۳۵] همچنین، بیشینه سرعت زمین (PGV) یک پارامتر مفیدتر از بیشینه شتاب زمین (PGA) برای توصیف شاخص شدت حرکت زمین است. دلیل این رفتار آن است که سرعت نسبت به اجزای فرکانس‌های بالاتر حرکت زمین، حساسیت کمتری دارد. بنابراین، PGV باید در توصیف پتانسیل آسیب‌رسان حرکت زمین مفیدتر از PGA باشد.^[۳۶] در شکل ۷ مقایسه‌ی تاریخچه زمانی مقادیر Ru ، شتاب، سرعت و شدت آریاس تحت اثر زلزله Coyote Lake نشان داده شده است. مدت زمان موثر زلزله Coyote Lake (۳/۰۴ ثانیه) روی نمودار مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدت زمان اعمال پالس (مدت زمان موثر)، ضریب اضافه فشار آب حفره‌ای (Ru) حدود ۹۰ درصد افزایش یافته و خاک به روانگرایی ($Ru = 1$) رسیده است. مشاهده این رفتار، اهمیت بررسی اثر پالس رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک را بیش از پیش نشان می‌دهد. این رفتار در تمامی زلزله‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود. عبور امواج از خاک سست موجب بزرگ‌نمایی آن‌ها می‌شود. شکل ۸ طیف‌های پاسخ شبه شتاب متناظر با رکورد Coyote Lake اعمال شده در محل سنگ بستر و پاسخ شتاب ثبت شده در سطح زمین را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با عبور امواج زلزله از خاک، زمان تناوب غالب خاک تغییر کرده و همچنین محدوده وسیع‌تری از زمان تناوب تحت تأثیر قرار گرفته است. جهت بررسی تغییرات زمان تناوب اصلی لایه خاک در اثر اعمال یک رکورد زلزله مشخص، می‌توان در هر زمان تناوب نسبت دامنه طیف پاسخ شبه شتاب مربوط به شتاب به دست آمده در سطح زمین به دامنه طیف پاسخ شبه شتاب رکورد اعمال شده در محل سنگ بستر را به دست آورد. از رسم مقدار این نسبت در برابر زمان تناوب، نموداری به دست می‌آید که زمان تناوب‌های متناظر با قله‌های آن بیانگر نحوه تغییر زمان تناوب خاک در اثر اعمال زلزله می‌باشند. شکل ۹ این نمودار را برای رکورد Coyote Lake نشان می‌دهد. در این شکل زمان تناوب متناظر با بلندترین قله بیانگر زمان تناوب لایه خاک در حالت تقریباً خطی و زمان تناوب‌های بزرگ‌تر متناظر با قله‌های بعدی بیانگر افزایش زمان تناوب لایه خاک در اثر تغییر شکل‌های غیرخطی می‌باشد. این رفتار در سایر زلزله‌های حوزه نزدیک نیز دیده می‌شود.

ایجاد شده نیز در زمان اعمال پالس بوده است. رفتار شمع به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. اما مشاهده می‌شود که در انتهای تاریخچه زمانی تغییر مکان نسبی شمع تحت اثر زلزله‌های متفاوت، یک تغییر مکان ماندگار ایجاد شده است. می‌توان گفت این تغییر مکان‌ها به دلیل فشار جانبی ناشی از تغییر شکل‌های خاک اطراف شمع هستند.

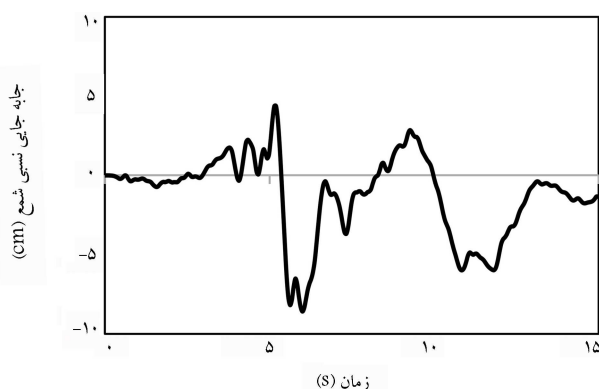
۴. نتیجه‌گیری

به منظور بررسی اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی پاسخ شمع - ماسه روانگر، مدل‌سازی خاک و شمع در نرم‌افزار FLAC ۳D انجام شد. این مدل به صورت دو لایه خاک در نظر گرفته شد که لایه بالایی با تراکم کم (شل) و لایه پایینی به صورت متراکم هستند. مدل تحت اثر چهار شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک که روی سنگ بستر ثبت شده‌اند، قرار گرفت. برای مدل‌سازی رفتار ماسه اشباع با مدل رفتاری P۲Psand مدل‌سازی شد. این مدل، اصلاح شده مدل دافالیاس - منظری است. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها به صورت زیر ارائه می‌شوند:

- در بازه زمانی اعمال پالس موجود در رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک، ضریب فشار آب حفره‌ای افزایش یافته و روانگرایی در لایه‌ی خاک بالایی ایجاد شده است. این افزایش حدود ۹۰ درصد بوده و خاک به روانگرایی کامل رسیده است.
- با افزایش عمق، ضریب Ru کاهش می‌یابد که نشان دهنده مقاومت بیشتر در مقابل روانگرایی است.
- وجود پالس سرعت در زلزله‌های حوزه نزدیک عامل اصلی بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی در مدت اعمال پالس است.



شکل ۱۱. تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نسبی شمع را برای زلزله‌ی ۰۱ (Pacoima Dam (upper left)) Northridge-



شکل ۱۲. تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نسبی شمع را برای زلزله‌ی Kocaeli, Turkey (Gebze).

پانویس‌ها

1. Flow Liquefaction
2. Cyclic Softening
3. Directivity
4. Fling Step
5. Undrained Hollow Cylinder Cyclic Torsional Test
6. Free Field
7. Model Fluid Active ON
8. Model Mechanical Active OFF
9. Model Mechanical Active ON
10. Model Fluid Active Off
11. Significant Duration
12. Arias Intensity
13. Peak Ground Velocity (PGV)
14. Peak Ground Acceleration (PGA)

منابع (References)

1. Japanese Road Association (JRA)., 1996. Specification for Highway Bridges. Part V, Seismic Design. Tokyo, Japan.

2. Tokimatsu, K., Mizuno, H. and Kakurai, M., 1996. Building damage associated with geotechnical problems, *Soils and Foundations*, 36, pp.219-234. <https://doi.org/10.3208/sandf.36.Special.219>.
3. Bhattacharya, S. and Madabhushi, S., 2008. A critical review of methods for pile design in seismically liquefiable soils. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(3), pp.407-446.
4. Tokimatsu, K., Tamura, S., Suzuki, H. and Katsumata, K., 2012. Building damage associated with geotechnical problems in the 2011 tohoku pacific earthquake. *Soils and Foundations*, 52(5), pp.956-974. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.014>.
5. Zhang, X., Tang, L., Ling, X., Chan, A.H.C., and Lu, J., 2018. Using peak ground velocity to characterize the response of soil-pile system in liquefying ground. *Engineering Geology*, 240, pp.62-73. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.011>.
6. Han, Z., Cheng, X. and Ma, Q., 2016. An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(4), pp.673-679. <http://dx.doi.org/10.1007/s11803-016-0357-6>.

7. Knappett, J. and Madabhushi, S., 2009. Seismic bearing capacity of piles in liquefiable soils. *Soils and Foundations*, 49(4), pp.525-535. <https://doi.org/10.3208/sandf.49.525>.
8. Zhang, X., Tang, L., Ling, X. and Chan, A., 2020. Critical buckling load of pile in liquefied soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135, p.106197. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106197>.
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, pp.35-46. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.04.007>.
10. Zhanfang, H., Xiaohong, B., Chao, Y. and Yanping, W., 2020. Vertical bearing capacity of a pile-liquefiable sandy soil foundation under horizontal seismic force. *PLoS One*, 15(3), p.e0229532. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0229532>.
11. Chen, Y., Zhang, Z. and Liu, H., 2017. Study of the seismic performance of hybrid A-frame micropile/MSE (mechanically stabilized earth) wall. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16(2), pp.275-295. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017EEEEV16..275C/doi:10.1007/s11803-017-0382-0.
12. Galandarzadeh, A. and Ahmadi, A., 2012. Effects of anisotropic consolidation and stress reversal on the liquefaction resistance of sands and silty sands. *Geotech Eng J SEAGS AGSSEA*, 43(2), pp.33-39.
13. Mo, T., Wu, Q., Li, D.Q. and Du, W., 2022. Influence of ground motion characteristics (velocity pulse and duration) on the pile responses in liquefiable soil deposits. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 159, p.107330. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107330>.
14. Baker, J.W., 2007. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), pp.1486-1501. <https://doi.org/10.1785/0120060255>.
15. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C., 2001. Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(12), pp.1769-1789. <https://doi.org/10.1002/eqe.92>.
16. Kalkan, E. and Kunnath, S.K., 2006. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, 22(2), pp.367-390. <https://doi.org/10.1193/1.2192560>.
17. UBC, U.B.C., 1997. Uniform building code. In Int. Conf. Building Officials.
18. Tothong, P. and Cornell, C.A., 2008. Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(7), pp.1013-1037. <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.792>.
19. Pant, D.R. and Maharjan, M., 2016. On selection and scaling of ground motions for analysis of seismically isolated structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(4), pp.633-648. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2016EEEEV15..633P/doi:10.1007/s11803-016-0354-9.
20. Jalali, R.S. and Tokmechi, Z., 2016. A note on the surface motion of a semi-cylindrical canyon for incident cylindrical SH waves radiated by a finite fault. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(3), pp.445-455. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2016EEEEV15..445J/doi:10.1007/s11803-016-0335-z.
21. Abbasi Karafshani, S., Ardakani, A. and Yakhchalian, M., 2017. An investigation on the effect of near-field pulse-like ground motions on the seismic response of a soil-pile-structure system. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(2), pp.115-125. <https://doi.org/10.24200/j30.2017.4545>.
22. Davoodi, M., Jafari, M. and Hadiani, N., 2013. Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ground motion excitation. *Engineering Geology*, 158, pp.66-76. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.02.008>.
23. Saeedi, M., Dehestani, M., Shooshpasha, I., Ghasemi, G. and Saeedi, B., 2018. Numerical analysis of pile-soil system under seismic liquefaction. *Engineering Failure Analysis*, 94, pp.96-108. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.07.031>.
24. Rajeswari, J. and Sarkar, R., 2020. Estimation of transient forces in single pile embedded in liquefiable soil. *International Journal of Geomechanics*, 20(9), p.06020023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001788](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001788).
25. Itasca, F.D., 2021. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, Version 7.0. Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, 438.
26. Wilson, D.W., 1998. Soil-Pile-Superstructure Interaction in Liquefying Sand and Soft Clay. Ed: Citeseer.
27. WILSON, D., 1998. Soil-pile-Superstructure Interaction In Liquefying Sand and Soft Clay. University of California Davis, Report, pp.UCD/CGM-98/04.
28. Cheng, Z. and Detournay, C., 2021. Formulation, validation and application of a practice-oriented two-surface plasticity sand model. *Computers and Geotechnics*, 132, p.103984. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103984>.
29. Dafalias, Y.F. and Manzari, M.T., 2004. Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), pp.622-634. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:6\(622\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:6(622)).
30. Arulmoli, K., 1992. VELACS: verification of liquefaction analyses by centrifuge studies, laboratory testing program. Soil Data Report. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3740.8320>.
31. Haldar, S. and Babu, G.S., 2010. Failure mechanisms of pile foundations in liquefiable soil: Parametric study. *International Journal of Geomechanics*, 10(2), pp.74-84. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2010\)10:2\(74\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2010)10:2(74)).
32. Shahir, H., Pak, A., Taiebat, M. and Jeremić, B., 2012. Evaluation of variation of permeability in liquefiable soil under earthquake loading. *Computers and Geotechnics*, 40, pp.74-88. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.10.003>.

33. Paskaleva, I., Panza, G., Vaccari, F. and Ivanov, P., 2004. Deterministic modelling for microzonation of Sofia-an expected earthquake scenario. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 39(2), pp.275-295. <https://doi.org/10.1556/ageod.39.2004.2-3.10>.
34. Trifunac, M.D. and Brady, A.G., 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), pp.581-626. <https://doi.org/10.1785/BSSA065003058>.
35. Moustafa, A. and Takewaki, I., 2010. Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(5), pp.412-422. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.12.013>.
36. Panza, G.F., La Mura, C., Romanelli, F., and Vaccari, F. 2021. Earthquakes, Strong-Ground Motion. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*: Springer, 2021, pp.1-9.