



مقاله پژوهشی

تحلیل عددی تأثیر اختلاف فاز امواج دوسویه زمین لرزه بر رفتار روانگرایی خاک های دانه ای

غلامحسین رنجبر^{۱*}، محمود ساری خانی خرمی^۱

۱- گروه معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد صفاشهر، صفاشهر، ایران

(دریافت: تیر ۱۴۰۳، پذیرش: دی ۱۴۰۳)

چکیده

تغییر شکل های جانبی بزرگ به طور گسترده ای در محیط های روانگرا در طول زلزله های شدید مشاهده شده که باعث آسیب به سازه های سطحی و همچنین سازه های زیرزمینی شده است. انتشار عمودی موج برشی به سمت سطح زمین باعث ایجاد تنش برشی سیکلی و کاهش ضریب مقاومت سیکلی در خاک های دانه ای شده و احتمال روانگرایی را افزایش می دهد. عامل زمین لرزه ذاتاً ماهیت چندسویه دارد که همواره دامنه و جهت آن در حال تغییر است. این ویژگی بارگذاری در زمانی که امواج منتهجه از میان لایه های خاک انتشار می یابند باعث ایجاد الگوهای پیچیده ای از رفتار تنش-کرنش می شود. آزمایش های آزمایشگاهی و میز لرزان (شتاب ثقلی واحد یا سانتریفیوژی) و روش های عددی، روش های پیشنهادی جهت مطالعه رفتار روانگرایی خاک تحت تنش برشی سیکلی چندسویه می باشند. در این مطالعه شبیه سازی عددی سه بعدی تفاضل محدود برای ستون ماسه اشباع تحت امواج سیکلی برشی دوسویه با اختلاف فازهای متفاوت انجام و نتایج آن تجزیه و تحلیل شد. مدل عددی با مقایسه نتایج آزمایش میز لرزان سانتریفیوژی منتشر شده توسط سو و همکاران صحت سنجی شد. اعتبار سنجی مدل عددی نشان داد که مدل رفتاری P2PSand و روش عددی تفاضل محدود برای شبیه سازی پدیده روانگرایی خاک های دانه ای ایجاد شده به وسیله امواج سیکلی برشی دوسویه مناسب است. تأثیر اختلاف فاز امواج سیکلی برشی دوسویه بر روی رفتار خاک دانه ای در مطالعات محققین پیشین کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است که نیاز به مطالعات بیشتر است، بنابراین در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان نشست و افزایش فشار آب حفره ای در ستون ماسه ای برای لرزش دوسویه به اختلاف فاز لرزش در دو راستا بستگی دارد و با افزایش اختلاف فاز، مقدار بیشینه نشست و افزایش فشار آب حفره ای کاهش می یابد و مقدار بیشینه این پارامترها در لرزش دوسویه برای تمام اختلاف فازها بیشتر از لرزش تک سویه است.

کلمات کلیدی

روانگرایی، زمین لرزه، امواج دوسویه، مدل P2PSand، تفاضل محدود

*عهده دار مکاتبات: engineerranjbar@yahoo.com

DOI: 10.22034/ANM.2024.21856.1641

۱- مقدمه

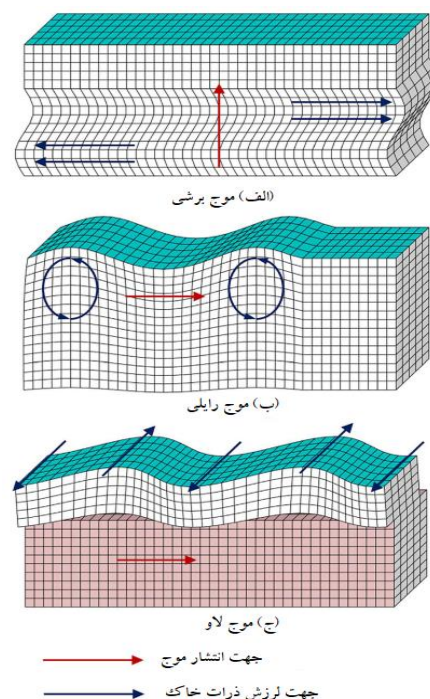
تانگشان، روانگرایی خاک به دلیل موج‌های سطحی را مشخص نمودند [۲]. من در سال ۱۹۹۲ از طریق مدل‌سازی‌های فیزیکی کوچک بر روی میز لرزان، نشان داد که جوشش مقادیری ماسه بر روی سطح زمین در زمین‌لرزه تانگشان به وسیله موج رایی ایجاد شده است [۳]. وولف در سال ۱۹۸۵ و سویی در سال ۲۰۰۴ با تحلیل کوپلینگ سیال-جامد نشان دادند که موج رایی نسبت به موج برشی می‌تواند ایجاد حداکثر تنش برشی بزرگ‌تری نماید و یک دلیل مهم روانگرایی در اعماق سطحی زمین است [۴-۵].

جیانگ در سال ۲۰۲۱ پتانسیل روانگرایی مواد دانه‌ای تحت بار موج SH و موج لاو با استفاده از روش المان مجزا (DEM) مقایسه و توصیه کردند که کاهش تنش مؤثر تحت بارگذاری چندجهته به دلیل امواج سطحی با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد [۶]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۲ با استفاده از روش عددی المان محدود (FEM) اثبات کردند که کوپل موج برشی-موج رایی که القاکننده تغییر شکل‌های جانبی است می‌تواند عاملی برای گسترش جانبی بزرگ در تقریباً تراز روانگرایی زمین باشند [۷].

عامل زمین‌لرزه ذاتاً ماهیت چندسویه دارد که همواره دامنه و جهت آن در حال تغییر است. این ویژگی بارگذاری باعث ایجاد الگوهای پیچیده‌ای از رفتار تنش-کرنش در زمانی که امواج منته‌جه از میان لایه‌های خاک انتشار می‌یابند، می‌شود. شکل ۲- نمودار رکوردهای شتاب‌های افقی نسبت به زمان در جهت غربی-شرقی و شمالی-جنوبی و شتاب‌های افقی نسبت به هم برای زمین‌لرزه ۱۹۹۵ کوبه در ایستگاه شین-اوساکا ژاپن نشان می‌دهد که بی‌نظمی‌های بارگذاری و تغییر جهت برشی نمود می‌یابد. اعمال هم‌زمان چنین مؤلفه‌های افقی نسبت به یک مؤلفه به احتمال زیاد همان‌طور که مطالعات آزمایشگاهی از سال ۱۹۷۰ اذعان کرده‌اند، واکنش حجمی را افزایش می‌دهد [۸]. پایک و سید آزمایش میز لرزان تک‌سویه و دوسویه بر روی نمونه‌های ماسه خشک مونتری با چگالی نسبی ۶۰ درصد انجام دادند و معلوم شد که برش دوسویه مقدار نشست را بیش از ۱۰۰ درصد در مقایسه با برش تک‌سویه افزایش می‌دهد. علاوه بر این، فشار آب حفره‌ای محاسبه‌شده مرتبط با مدل مارتین و همکاران پیشنهاد داد که در بارگذاری برشی دوسویه، ضریب تنش سیکی (CSR) موردنیاز شکل‌گیری روانگرایی یا ضریب مقاومت سیکی (CRR) ۱۰-۲۰ درصد کوچک‌تر بود. شکل ۳ نتایج اصلی مطالعات فوق‌الذکر را نشان می‌دهد [۹].

تغییر شکل‌های جانبی بزرگ به‌طور گسترده‌ای در محیط‌های روانگرا در طول زلزله‌های شدید مشاهده‌شده که باعث ایجاد پدیده روانگرایی و آسیب به سازه‌های سطحی و همچنین زیرزمینی شده است. در زمین‌لرزه، روانگرایی خاک عموماً به دلیل انتشار امواج لرزه‌ای از حرکت کم‌مرکز تا نزدیک میدان در طول زمین‌لرزه است. همچنین موج‌های سطحی شامل موج رایی و لاو مخصوصاً در نزدیکی سطح زمین که عمده‌تاً روانگرایی شکل می‌گیرد، سهم ویژه‌ای در تکانه‌های شدید زمین دارند. هرچند که این امواج به‌ندرت در تحلیل تغییر شکل‌های روانگرایی (حین و بعد) در نظر گرفته شده است [۱].

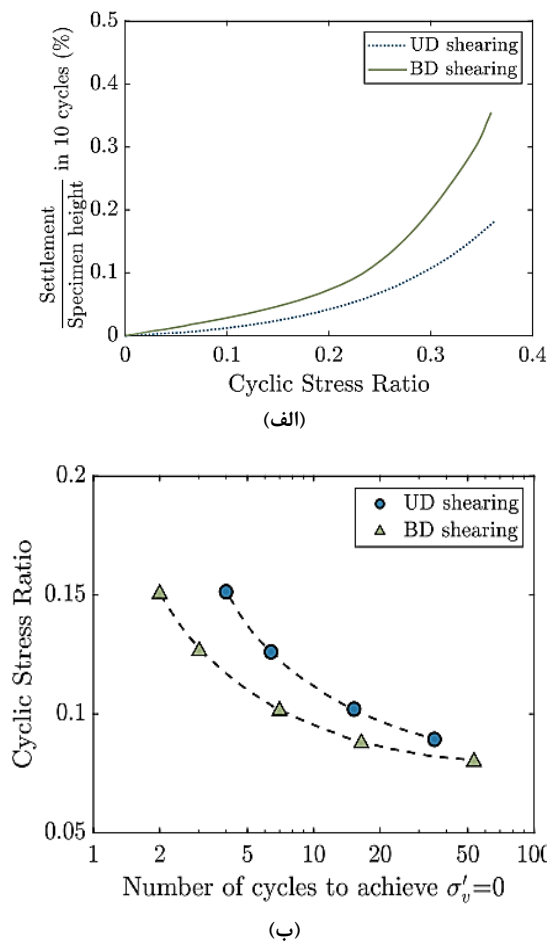
شکل ۱ خصوصیات موج‌های سطحی و برشی را با جزئیات نشان می‌دهد که موج‌های سطحی تنش‌های برشی قابل‌توجهی در اعماق کم ایجاد می‌کنند و بالقوه منجر به روانگرایی خاک می‌شوند. علاوه بر این، موج‌های سطحی باعث القای حرکات دینامیکی نامتقارن زمین و ایجاد کرنش‌های ناهموار درون خاک می‌شوند [۱].



شکل ۱: چندین نوع از امواج زمین‌لرزه [۱].

در مطالعات موجود بر اهمیت موج‌های سطحی در ایجاد روانگرایی خاک، تأکید شده است. فنگ و همکاران در سال ۱۹۷۹ با بررسی‌های میدانی و نقشه‌های هوایی از زمین‌لرزه

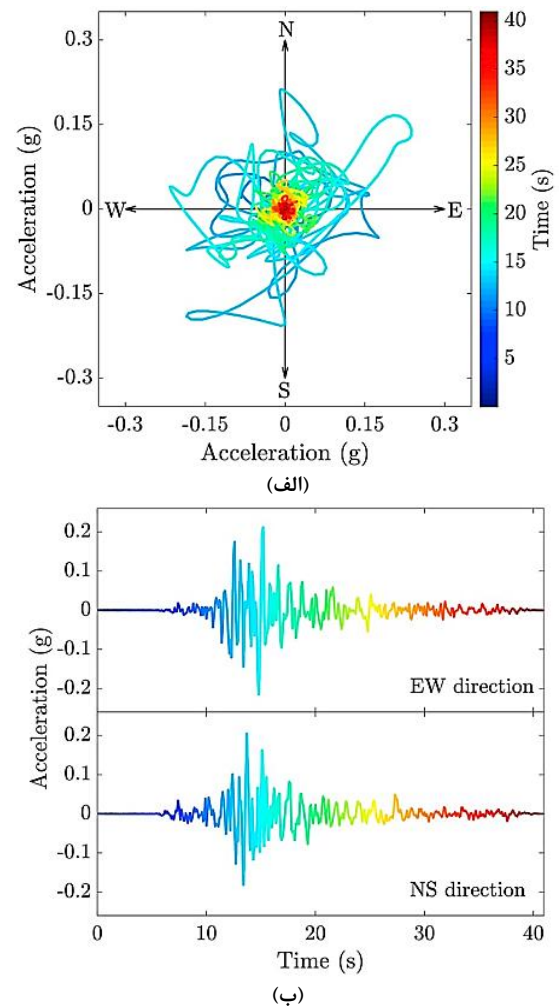
نیست و توسعه کرنش های برشی بزرگ برای مقادیر کمتر از ۰.۷ مشاهده شد [۱۱].



شکل ۳: نتایج آزمایش میز لرزان تک سویه و دوسویه بر روی نمونه های ماسه خشک مونتری الف - نشست و ب - ضریب تنش سیکلی [۹].

سو و لی واکنش لایه ضعیف ماسه ای واقع در تراز اشباع زمین را بر اساس آزمایش های سانتیفریوژی تحت بارگذاری های برشی دوسویه و تک سویه بررسی کردند. با استفاده از شکل موج نوع سینوسی به عنوان بارگذاری اعمالی مدل سانتیفریوژی، آن ها مشاهده کردند که اضافه فشار آب حفره ای و نشست پسالرزه ای به ترتیب به مقدار ۲۰ و ۱۰ درصد افزایش می یابد [۱۲].

هاشمی نژاد و بهادری در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار FLAC3D به شبیه سازی پدیده روانگرایی با استفاده از مدل رفتاری Finn پرداختند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای زاویه اصطکاک و چگالی نسبی خاک روانگرا بر روی مقاومت روانگرایی خاک دانه ای مورد بررسی قرار گرفت [۱۳].



شکل ۲: رکوردهای شتاب نگاشت زمین لرزه کوبه سال ۱۹۹۵ در ایستگاه شین-اوساکا: الف - تاریخچه شتاب های افقی و ب - شتاب های افقی نسبت به هم (داده های پایگاه اطلاعات حرکات شدید پیتر) [۸].

آزمایش های برشی سیکلی ساده دوسویه با استفاده از نمونه های ماسه رودخانه فوجی تحت شرایط زهکشی نشده توسط ایشیهارا و یامازاکی انجام و گزارش شد که مقادیر CRR محاسبه شده نسبت به آزمایش های برش تک سویه، ۳۰ درصد کمتر می باشند [۱۰]. کامرر مجموعه ای از آزمایش های برشی سیکلی ساده دوسویه بر روی نمونه های ماسه مونتری با استفاده از چندین نوع الگوی بارگذاری تکمیل کرد. تحلیل نتایج معلوم کرد که کاهش ۱۰-۲۰ درصد مقادیر CRR مشخص شده توسط سید و همکاران می تواند تخمین بیش از حدی از مقاومت روانگرایی تحت بارگذاری برشی دوسویه ارائه دهد. علاوه بر این، مشخص شد که ضریب اضافه فشار آب حفره ای نزدیک یا برابر یک لزوم دستیابی به رفتار شبیه روانگرایی در طول بارگذاری دوسویه

گرفت؛ که یک طرح ادغام زمانی صریح جهت شبیه‌سازی واکنش دینامیکی محیط پیوسته سه‌بعدی استفاده می‌کند. در این برنامه نرم‌افزاری، محیط پیوسته به‌وسیله‌ی محدوده معادل مجزا جایگزین می‌شود که نیروها و جابجایی‌های مشتمل در تحلیل، در گره‌های شبکه سه‌بعدی متمرکز شده و برای نشان دادن محدوده مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر شبکه سه‌بعدی به‌وسیله تعدادی ناحیه یا المان با نرخ کرنش ثابت و شکل شش‌وجهی به‌هم‌پیوسته که رأس‌های آن‌ها منطبق با رأس‌های ناحیه‌های مجاور می‌باشند، تشکیل می‌شود. اندرکنش جفت سیال حفره‌ای- جامد در این برنامه مطابق با روابط جفت‌سازی در مکانیک محیط متخلخل است که به‌خوبی توسط بایوت ارزیابی و اثبات شده و توسط دتورنی و چنگ توسعه یافته است. روش عددی برای روابط جفت سازی در محیط‌های کاملاً اشباع متکی بر یک معادله متداوم سیال که جریان سیال را با تغییرات در فشار حفره‌ای و کرنش حجمی مرتبط می‌کند، است. حل این معادله نیاز به یک سری از گام‌های محاسباتی حلقه‌ای مشتمل بر حلقه‌های جریان سیال همراه با حلقه‌های مکانیکی جهت حفظ حالت تعادل است. حلقه‌های محاسباتی جریان سیال و مکانیکی، تغییرات به ترتیب در فشار حفره‌ای و کرنش حجمی به دلیل تعادل تنش مؤثر القاشده به‌وسیله حلقه‌های جریان سیال را محاسبه می‌کند. مدل رفتاری سیال همگن در این مطالعه برای شبیه‌سازی واکنش مکانیکی سیال حفره‌ای مورد استفاده قرار گرفت [۱۶].

آدیناتا یک مطالعه صحت‌سنجی دقیق بر روی اعتبار این پلتفرم عددی برای شبیه‌سازی انتشار امواج و اندرکنش سیال حفره‌ای-جامد انجام داد. ارزیابی نکات مهم شامل اندازه المان و مقدار گام زمانی مناسب، پارامترهای میرایی رایلی و شرایط مرزی مطلوب برای شبیه‌سازی چنین مسائلی به‌وسیله‌ی مقایسه‌ی این برنامه رایانه‌ای با تعدادی از راه‌حل‌های شکل بسته برای مسائل انتشار امواج تک‌بعدی الاستیک در میان محیط تک و دو فاز، انجام و نتیجه شد که برای انتشار تک‌بعدی امواج برشی در المان‌های مکعبی هشت‌گره‌ای، اندازه المان بایستی تقریباً کمتر از یک‌دهم کوچک‌ترین طول موج (λ_{min}) در محیط موردنظر باشد. که؛ کهاستفاده از رابطه ۱ به‌صورت نسبت حداقل سرعت انتشار موج (v_{min}) در محیط به حداکثر بسامد لرزه‌ای (f_{max}) تخمین زده می‌شود.

ریس و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر لرزش برشی دوسویه بر روی پتانسیل روانگرایی خاک دانه‌ای انباشته شده را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با امواج تک‌سویه مقایسه کردند [۱۴].

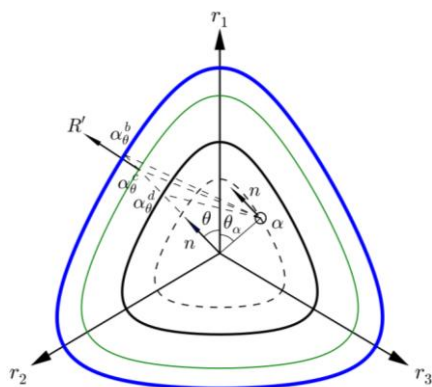
چنگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ با استفاده از نتایج آزمایش‌های سه‌محوره بر روی نمونه‌های خاک بستر دریا، روشی جدید جهت طبقه‌بندی روانگرایی پیشنهاد دادند. آن‌ها با استفاده از روش عددی اجزا محدود و به‌کارگیری نرم‌افزار آباکوس به شبیه‌سازی رفتار شمع فونداسیون توربین بادی واقع در خاک روانگرا تحت امواج لرزه‌ای مختلف پرداختند؛ و در آخر، روانگرایی خاک اطراف شمع فونداسیون تحت سناریوهای مختلف لرزش با استفاده از این روش طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۵].

در این مطالعه شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی تفاضل محدود برای ستون ماسه اشباع تحت امواج سیکلی برشی دوسویه با اختلاف فازهای متفاوت انجام و نتایج آن تجزیه و تحلیل شد. مدل عددی با مقایسه نتایج آزمایش میز لرزان سانتریفیوژی منتشر شده توسط سو و همکاران صحت‌سنجی شد. اعتبارسنجی مدل عددی نشان داد که مدل رفتاری و روش عددی انتخابی برای شبیه‌سازی پدیده روانگرایی خاک‌های دانه‌ای ایجاد شده به‌وسیله امواج سیکلی برشی دوسویه مناسب است. با توجه به اینکه تأثیر اختلاف فاز امواج سیکلی برشی دوسویه بر روی رفتار خاک دانه‌ای در مطالعات محققین پیشین کمتر مورد مطالعه قرار گرفته بود، نیاز به مطالعات بیشتر وجود دارد که در این مطالعه پارامتر اختلاف فاز امواج سیکلی برشی دوسویه بر روی مقدار نشست و افزایش فشار آب حفره‌ای در خاک دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان نشست و افزایش فشار آب حفره‌ای در ستون ماسه‌ای برای لرزش دوسویه به اختلاف فاز لرزش در دو راستا بستگی دارد و با افزایش اختلاف فاز مقدار بیشینه نشست و اضافه فشار آب حفره‌ای کاهش می‌یابد و مقدار بیشینه این پارامترها در لرزش دوسویه بیشتر از لرزش تک‌سویه است.

۲- چهارچوب روش عددی

این بخش روش محاسباتی مورد استفاده در همه شبیه‌سازی‌های موجود در این مقاله را همراه با تشریح جزئیات مدل رفتاری معرفی می‌کند. شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار رایانه‌ای تفاضل محدود FLAC3Dv9 انجام

مدول الاستیک وابسته به چگالی نسبی و همچنین تنش است، خط حالت بحرانی به صورت یک تابع دو یا سه پارامتری از نظر چگالی نسبی بیان می شود، یک رابطه نمایی جهت تعریف سطوح اتساع و مرزی از نظر شاخص اتساع بیان می شود، مدول پلاستیک یک تابع خطی از چگالی نسبی است که از فاکتورگیری توابع f_1 و f_2 به ترتیب مربوط به کرنش پلاستیک برشی تجمعی و چگالی نسبی محاسبه می شود، روابط اتساع بازنگری شد و کاهش تدریجی در مدول برشی الاستیک معرفی می شود. با توجه به شکل ۴ تعداد بیش از دو سطح در این مدل رفتاری استفاده می شود، ولی دو سطح مورد استفاده در نام این مدل مربوط به سطح مرزی و سطح تسلیم در نسخه اصلی مدل های رفتاری MD97 و DM04 است. این مدل رفتاری در کد نرم افزار ژئوتکنیکی تجاری موجود FLAC3D مبتنی بر چهارچوب روش عددی تفاضل محدود سه بعدی پیاده سازی شده است. این مدل رفتاری فرمولاسیون سه بعدی عمومی را حفظ می کند. پارامترهای پیش فرض (کالیبره شده در داخل نرم افزار) این مدل رفتاری به ماسه میدان مقاومت سیکلی استاندارد (SCRF) اعمال می شود که با جدول مقاومت سیکلی روش شبه تجربی سازگار است. هر چند که مدل رفتاری به کاربر مجوز اختصاص پارامترهای سفارشی به جای مقادیر پیش فرض مطابق با این پارامترها را می دهد. فرمولاسیون، صحت سنجی و کاربردهای عملیاتی این مدل رفتاری توسط چنگ و دتورنی در سال ۲۰۲۱ منتشر شد [۱۸].



شکل ۴: شماتیک سطوح در صفحه π با شکل یکسان اما با اندازه های مختلف (از بیرونی رین سطح به سمت داخلی ترین سطح): سطح مرزی، سطح حالت بحرانی، سطح اتساع، سطح حداکثر ضریب تنش برگشتی. دایره کوچک بر روی سطح حداکثر ضریب تنش برگشتی، سطح تسلیم است [۱۸].

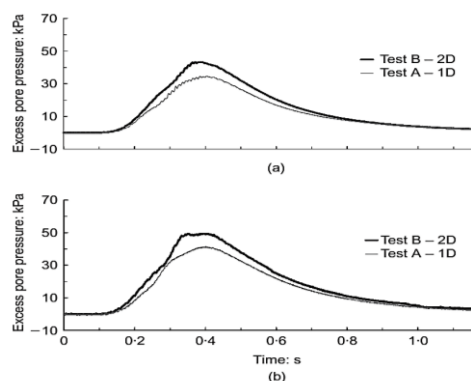
$$\lambda_{\min} = \frac{v_{\min}}{f_{\max}} \quad (1)$$

از جهت دیگر، گام زمانی محاسباتی باید مانع از رسیدن موج در دو گره متوالی به صورت هم زمان برای سریع ترین انتشار شود که در غیر این صورت یک خصلت بنیادی انتشار موج را نقض کرده و منجر به ناپایداری عددی می شود. گام زمانی مناسب را می توان در ابتدا به صورت نسبت اندازه کوچک ترین المان به حداکثر سرعت موج تخمین زد. هر چند که این تخمین بایستی با یک ضریب ۵ تا ۱۰ کاهش یابد تا از ناپایداری های عددی ممکن ایجاد شده با طرح ادغام زمانی صریح در روش محاسباتی جلوگیری نماید. همان طور که توسط کوک توصیه شده است، ضرایب میرایی راییلی باید طوری انتخاب شود که محدوده فرکانسی بین اولین و سومین مود فرکانس محیط را پوشش دهد. نهایتاً برای مدل سازی ترازهای زمین با کف صلب که انتشار موج تک بعدی مورد انتظار است، شرایط مرزی اعمالی شامل ثابت نگه داشتن جابجایی های عمودی در کف محدوده و بستن گره های اطراف در هر تراز است [۱۷].

۳- مدل رفتار روانگرایی ماسه تحت بار زمین لرزه

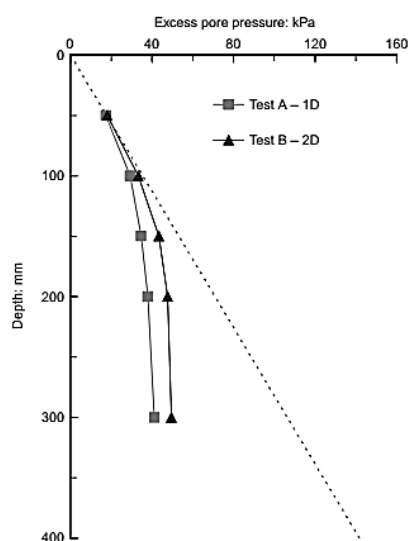
استفاده از مدل های رفتاری غیرخطی چندبعدی جهت شبیه سازی پدیده روانگرایی در خاک های دانه ای مثل ماسه در زمینه مهندسی ژئوتکنیک زمین لرزه در حال افزایش است. پرکاربردترین مدل های رفتاری در این زمینه که اخیراً در تحقیقات محققین مورد استفاده قرار گرفته است، مدل های رفتار پلاستیسیته دوسطی ماسه شامل مدل PM4Sand، CycLiq، NTUASand، UBCSand، MD97، DM04 و P2PSand می باشند [۱۸].

مدل رفتاری P2PSand (پلاستیک دوسطی عملی برای ماسه) در سال ۲۰۲۱ توسط چنگ و دتورنی معرفی شد. این مدل بر اساس تجدید فرمولاسیون مدل DM04 از نظر اطلاعات آزمایش برجایی چگالی نسبی است. مزیت های این مدل مبنای محکم تئوری و نظری و خلاصه مدل اصلی DM04 است که کیفیت های اجرا محور مدل های رفتاری UBCSand و PM4Sand را شامل است. مدل رفتاری DM04 از نظر نسبت پوکی بیان می شود در صورتی که مدل P2PSand کلاً از نظر چگالی نسبی فرمول سازی مجدد شد. تغییرات زیر در فرمولاسیون جدید پیاده سازی شد:



شکل ۵: تأثیر الگوی لرزش بر روی واکنش اضافه فشار آب حفره‌ای (اندازه‌گیری شده): الف - عمق ۱۵۰ میلی‌متر، ب - عمق ۳۰۰ میلی‌متر [۱۲].

شکل ۶ نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای بیشینه برای این دو آزمایش را نشان می‌دهد. در آزمایش B فشار آب حفره‌ای حداکثر در عمق ۳۰۰ میلی‌متر حدود ۲۰ درصد بیشتر از آزمایش A است. اختلاف درصدی اضافه فشار آب حفره‌ای بین لرزش تک‌سویه و دوسویه در اعماق ۲۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر مشابه است، اما این اختلاف در عمق ۱۰۰ میلی‌متری حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. خط نقطه‌چین در این نمودار تنش عمودی مؤثر اولیه است. در شکل ۷ مقادیر سانتیفریوژی نشست نشان داده شده است که مقادیر نشست نهایی سطح زمین برای لرزش تک‌سویه و دوسویه به ترتیب برابر با ۸/۱۴ و ۹/۱ میلی‌متر و این مقادیر برای محاسبه مقدار نشست در نمونه با ابعاد واقعی در ۴۰ ضرب می‌شود.



شکل ۶: نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای بیشینه برای دو آزمایش A و B نسبت به عمق [۱۲].

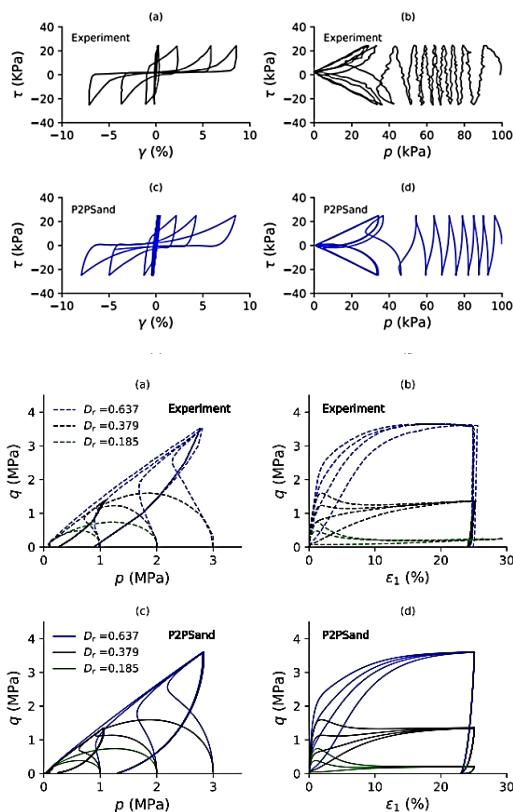
۴- صحت‌سنجی روش عددی با روش و نتایج آزمایش سانتیفریوژی سو و همکاران

در این مطالعه از نتایج آزمایش میز لرزان سو و همکارانش جهت صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی انجام‌شده استفاده شد که در این قسمت روش و نتایج این آزمایش میز لرزان تشریح شده است.

آزمایش‌ها بر روی لرزاننده هیدرولیکی دومحوره نصب‌شده در سانتیفریوژ HKUST انجام شدند. برای حداقل نمودن تأثیرات مرزی ظرف آزمایش بر روی واکنش مدل، یک جعبه لمینار گرد استفاده شد. ماسه توپورا به‌عنوان مواد مورد آزمایش انتخاب شد. اندازه میانگین ذرات (D50) برابر ۰/۱۷ میلی‌متر با ضریب یکنواختی (Cu) برابر با ۱/۷ و نسبت پوکی حداقل (e_{min}) و حداکثر (e_{max}) به ترتیب برابر با ۰/۵۹۷ و ۰/۹۷۷ است. نمونه با استفاده از روش آبریزش هوا تهیه شد و سپس در شرایط خلأسازی با آب بدون هوا اشباع شد. قطر مدل ۶۰۰ میلی‌متر و ارتفاع آن ۴۰۰ میلی‌متر در حالت اشباع است. چگالی نسبی نمونه ۴۰ درصد و وزن واحد غوطه‌وری آن ۸/۸۶ کیلونیوتن بر مترمکعب است. برای رفتارنگاری کمیت‌های فیزیکی در حین و بعد از لرزش، مبدل‌هایی شامل شتاب‌سنج‌های مینیاتوری، مبدل‌های فشار آب حفره‌ای و سنسورهای الکترومکانیکی (LVDT) نصب‌شده در داخل و بر روی مرزهای مدل مورد استفاده قرار گرفت.

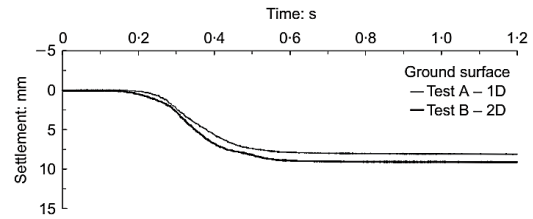
آزمایش‌های تحت شتاب سانتیفریوژی ۴۰g انجام شدند. شتاب ورودی هدف در کف نمونه شکل موج سینوسی اصلاح‌شده به‌وسیله‌ی پنجره هانینگ که با نام تابع هان نیز نامیده می‌شود، با یک فرکانس اصلاح‌نشده ۵۰ هرتز و مدت‌زمان ۰/۶ ثانیه است. دو آزمایش شامل آزمایش A (لرزش تک‌سویه) که اعمال موج ورودی در یک جهت و آزمایش B (لرزش دوسویه) که اعمال موج ورودی در دو جهت با اختلاف فاز ۹۰ درجه نسبت به هم بر کف مدل است. شتاب بیشینه موج ورودی در آزمایش A برابر با ۴/۴g و برای آزمایش B برابر با ۴/۴g در یک جهت و در جهت دیگر برابر با ۴g است. شکل ۵- نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در اعماق ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر در آزمایش‌های A و B را نشان می‌دهد. مطابق به این نمودارها، در آزمایش B اضافه فشار آب حفره‌ای با نمونه بالاتری نسبت به آزمایش A افزایش و به بیشینه مقدار آن می‌رسد [۱۲].

شده است. ماسه توپورا ژاپنی ماسه ریزدانه کوارتزیتی یکنواخت شامل ذرات نیمه گرد و نیمه زاویه دار شامل ۷۵ درصد کوارتز، ۲۲ درصد فلدسپار و ۳ درصد مگنتیت است. نتایج مدل سازی عددی ژائو چنگ و همکاران نشان داد که مدل رفتاری P2PSand توانایی عالی جهت شبیه سازی رفتار روانگرایی ماسه فوق الذکر دارد. انطباق نتایج آزمایشگاهی و عددی با مدل رفتاری P2PSand برای آزمایش های فشاری سه محوره زهکشی شده و زهکشی نشده بر روی نمونه های تحکیم یافته ایزوتروپیک در شکل ۹ نشان داده شده است.



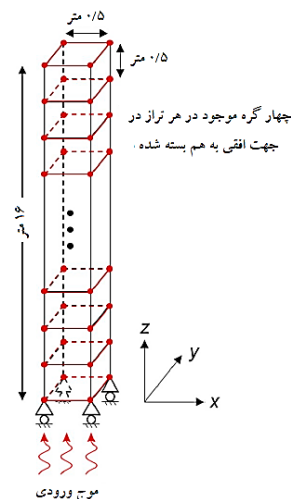
شکل ۹: نتایج صحت سنجی مدل رفتاری P2PSand با نتایج آزمایشگاهی توسط ژائو چنگ [۱۸].

هدایت هیدرولیکی مورد استفاده در این شبیه سازی با دو ضریب در نظر گرفته شد که یکی ضریب مقیاس استاندارد جهت آزمایش سانتریفیوژی و دیگری ضریب مقیاس اضافی برای محاسبه پدیده تحریک است. ضریب مقیاس تحریک که مطابق با رویکرد مورد استفاده توسط سو و همکاران است جهت شبیه سازی افزایش هدایت هیدرولیکی خاک روانگرا در آزمایشات سانتریفیوژی در نظر گرفته می شود. این ضریب به طور گسترده ای در تحقیقات محققین متمرکز بر خاک های روانگرا مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. موج ورودی به



شکل ۷: نمودار نشست سطح زمین در دو آزمایش A و B که نشست نهایی سطح زمین در آزمایش B برابر با ۹٫۱ میلی متر و در آزمایش A برابر با ۸٫۱۴ میلی متر است [۱۲].

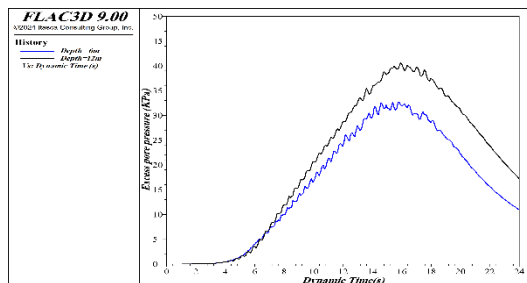
مدل عددی مورد استفاده جهت شبیه سازی آزمایش سانتریفیوژی سو و همکاران یک ستون خاکی با ابعاد واقعی و نه در ابعاد سانتریفیوژی است که در نرم افزار FLAC3DV9 ایجاد شد. این مدل عددی همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است از تعداد ۳۲ زون مکعب مربع هشت گره ای به اضلاع ۵۰ سانتی متر و تعداد ۴۴ گره به ارتفاع کلی ۱۶ متر تشکیل شده است. جابجایی های عمودی در مرز پایینی ثابت و در دو جهت افقی آزاد و بار دینامیکی دوسویه بر این مرز اعمال می شود. چهار گره هم تراز در جهت افقی به هم بسته شده است. چهار سطح جانبی و سطح پایینی مدل از نظر هیدرولیکی نفوذناپذیر و سطح بالایی نفوذپذیر در نظر گرفته شد



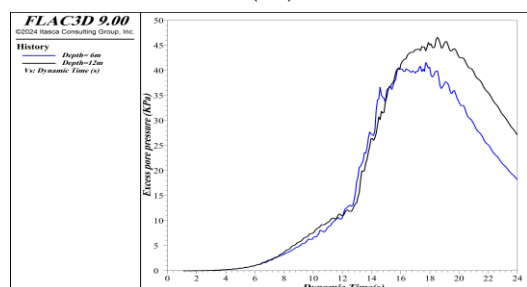
شکل ۸: هندسه، ابعاد و شرایط مرزی مدل عددی در نرم افزار FLAC3DV9

مدل رفتاری P2PSand جهت شبیه سازی پدیده روانگرایی ماسه توپورا مورد استفاده قرار گرفت که پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی ماسه مورد نظر متناظر با این مدل رفتاری از بررسی عددی ژائو چنگ در سال ۲۰۲۱ بر روی آزمایش های آزمایشگاهی انجام شده توسط وردوگو و ایشیهارا در سال ۱۹۹۶ استخراج و کالیبره شد که در جدول ۱ ذکر

نتایج عددی این پارامترها به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه‌شده از روش عددی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



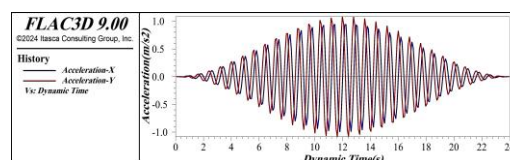
(الف)



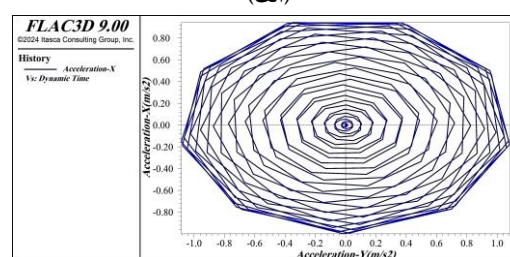
(ب)

شکل ۱۱: نمودارهای اضافه فشار آب حفره‌ای برای عمق‌های ۶ و ۱۲ متری (الف) - لرزش تک‌سویه (ب) - دوسویه.

مدل عددی مطابق با آزمایش سو به کف مدل عددی به مدت ۲۴ ثانیه اعمال شد که نمودار شتاب‌های افقی در دو جهت نسبت به زمان و نسبت به هم با فاز اختلاف فاز ۹۰ درجه در شکل ۱۰ به ترتیب الف و ب آورده شده است. نتایج صحت‌سنجی در این مطالعه شامل تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای و میزان نشت استخراج‌شده از مطالعات آزمایش میز لرزان سو است که در شکل‌های ۵ و ۷ نشان داده شده است.



(الف)



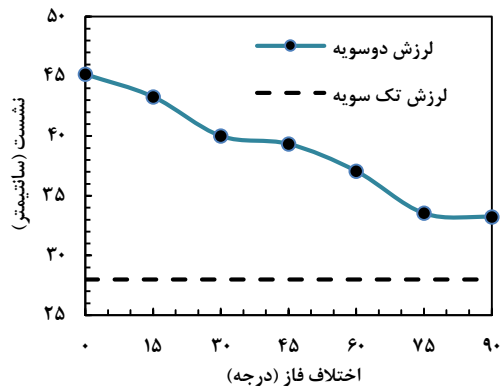
(ب)

شکل ۱۰: (الف) - نمودار شتاب‌های افقی با فاز ۹۰ درجه در دو جهت نسبت به زمان (ب) - نمودار شتاب‌های افقی با اختلاف فاز ۹۰ درجه در دو جهت نسبت به هم.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی ماسه توپورا متناظر با مدل رفتاری P2PSand [۱۸]

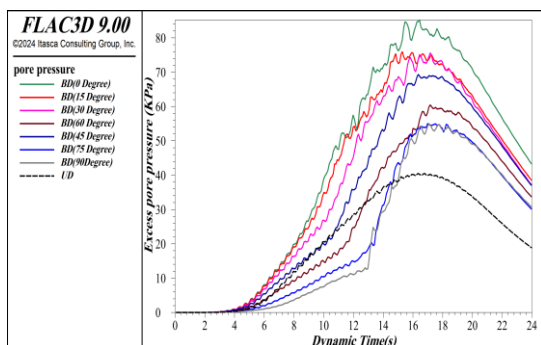
۱۴۲۰	ρ_s	چگالی ذرات جامد (Kg/m^3)	خصوصیات عمومی
۰٫۸۲۵	e	نسبت پوکی اولیه	
۰٫۰۳۲	k	هدایت هیدرولیکی (m/s)	
۰٫۷۴۵	ξ_{min}	میرایی حداقل (درصد)	میرایی رایلی
۱۳٫۵۸	f_{min}	فرکانس مرکزی (Hz)	
۱۰۰۰	ρ_f	چگالی آب (Kg/m^3)	مدل جریان سیال همگن
۲٫۲	K_f	مدول بالک آب (GN/m^2)	
۳۳	ϕ_{CS}	زاویه اصطکاک در حالت بحرانی (درجه)	P2PSand
۱۲۴۰	g_0	ثابت‌های حالت الاستیک	
۰٫۰۱	C_{Dr}	ضریب پواسون	
$0.1 \leq 0.1 + 0.015(\phi_{CS} - 25) \leq 0.4$	U	ثابت‌های حالت بحرانی	
$(0.115, 0.05, 0.07)$	$(D_{r0}, \lambda_c, \zeta) \text{ or } (Q, R)$	ثابت‌های نرخ کرنش دوپاتوریک پلاستیک	
$0.16 - \phi_{CS} / 40.0$	n^b	ثابت‌های نرخ کرنش دوپاتوریک پلاستیک	
$6n^b$	n^d	ثابت‌های نرخ کرنش دوپاتوریک پلاستیک	
۱٫۷	h_0	ثابت‌های نرخ کرنش دوپاتوریک پلاستیک	
۰٫۷۴	A_{d0}	ثابت‌های نرخ کرنش دوپاتوریک پلاستیک	
$g_0(D_{r0} + C_{Dr})$	c_z	ثابت‌های نرخ کرنش دوپاتوریک پلاستیک	
$21 D_{r0}^{3.85} \leq 15$	z_{max}	ثابت‌های نرخ کرنش دوپاتوریک پلاستیک	

همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است تأثیر اختلاف فاز بر روی مقدار نشست قابل توجه بوده است که با افزایش مقدار اختلاف فاز میزان بیشینه نشست کاهش می یابد و مقدار بیشینه نشست در اختلاف فاز صفر درجه مشاهده می شود. برای تمام مقادیر اختلاف فازها، مقدار نشست بیشتر از لرزش تک سویه است که با افزایش اختلاف فاز، اختلاف نشست بین لرزش دوسویه و تک سویه کاهش می یابد.



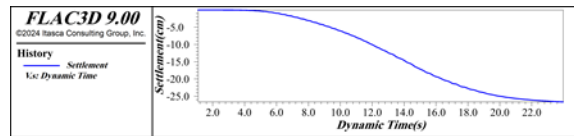
شکل ۱۴: تأثیر اختلاف فاز بر روی مقدار نشست.

با توجه به شکل ۱۵، نتیجه می شود که نرخ تغییرات اضافه فشار آب حفره ای در ابتدا تابعی از اختلاف فاز لرزش دوسویه است که با افزایش اختلاف فاز این نرخ در ابتدا کاهش می یابد، اما سپس این نرخ برای تمام اختلاف فازها تقریباً ثابت می شود. هرچند که این نرخ برای لرزش تک سویه کمتر از لرزش دوسویه است.

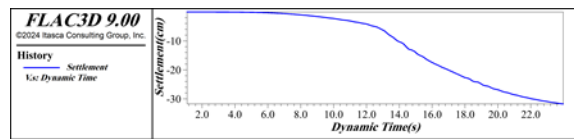


شکل ۱۵: تغییرات اضافه فشار آب حفره ای نسبت به زمان برای لرزش تک سویه و برای اختلاف فازهای متفاوت لرزش دوسویه.

شکل ۱۶ نشان می دهد که اضافه فشار حفره ای متأثر از اختلاف فاز امواج دوسویه است و تأثیر قابل توجه است. روند این تأثیر مشابه مقدار نشست بوده که با افزایش اختلاف فاز مقدار بیشینه اضافه فشار حفره ای کاهش یافته و برای تمام



(الف)



(ب)

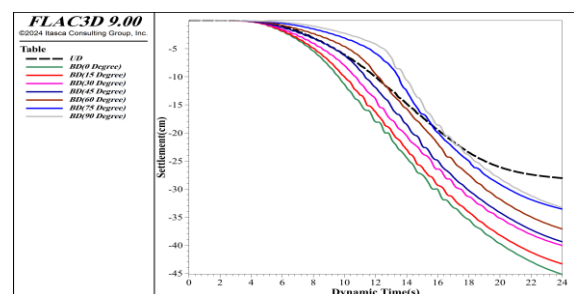
شکل ۱۲: نمودار نشست سطح زمین نسبت به زمان (الف) -

تک سویه (ب) - دوسویه

۵- تجزیه و تحلیل

با توجه به اینکه در تحقیقات محققین قبل، پارامتر اختلاف فاز لرزش دوسویه و تأثیر آن بر روی رفتار روانگرایی ماسه بررسی نشده بود و نیاز به بررسی این پارامتر بود، در این مطالعه مدل صحت سنجی شده که در بخش قبل تشریح شده است برای بررسی تأثیر پارامتر اختلاف فاز امواج دوسویه بر روی مقدار نشست و افزایش فشار حفره ای استفاده شد. اختلاف فاز در محدوده ۰ تا ۹۰ درجه با گام ۱۵ درجه مورد استفاده قرار گرفت. مدل صحت سنجی شده برای اختلاف فازهای مذکور اجرا و نتایج به صورت زیر ارائه می شود.

تاریخچه نشست سطح زمین نسبت به زمان برای تمام اختلاف فازها استخراج و ترسیم شد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. روند نشست صورت گرفته نسبت به زمان هم برای لرزش تک سویه و هم دوسویه یکسان است که در تشریح این روند می توان گفت که نرخ نشست نسبت به زمان سه مرحله دارد که ابتدا افزایش سپس ثابت و در آخر کاهش می یابد. با اینکه نرخ نشست برای تمام فازها در لرزش دوسویه تقریباً ثابت است، اما نسبت به لرزش تک سویه بیشتر است.



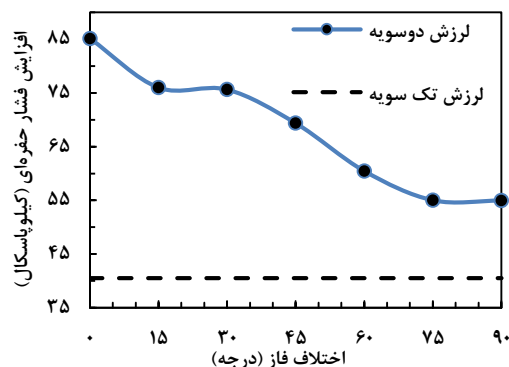
شکل ۱۳: تاریخچه نشست سطح زمین نسبت به زمان برای تمام اختلاف فازهای لرزش دوسویه و تک سویه.

۴- برای تمام مقادیر اختلاف فاز، مقدار بیشینه اضافه فشار حفره‌ای بیشتر از مقدار مشاهده شده در موج تک سویه است.

مراجع

- [1] Adinata, J. (2018). Impact of bidirectional seismic shearing on volumetric response of sand deposits. University of British Columbia, Master's thesis.
- [2] Cheng, Z. Detournay, C. (2021). Formulation, validation and application of a practice-oriented two-surface plasticity sand model. Computers and Geotechnics, 132, 103984.
- [3] Cui, J. Men, F. Wang, X. (2004). Soil Liquefaction induced by Rayleigh Waves. In 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada.
- [4] Fang, H. Q., Wang, Z. Q & Zao, S. D. (1979). Macroscopic mechanism of soil liquefaction and its influence on earthquake damage of ground. the 26th International Geological Congress.
- [5] Feng, F. Wenxian, Y. Sadegh, N. Bo, H. Guoxiang, H. (2023). Study for predicting the earthquake-induced liquefaction around the monopile foundation of offshore wind turbines. Ocean Engineering, 113421. doi:https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113421
- [6] Hasheminezhad, A. Bahadori, H. (2019). Three dimensional finite difference simulation of liquefaction phenomenon. International Journal of Geotechnical Engineering, 1-7. doi:10.1080/19386362.2019.1684639
- [7] Ishihara, K. Yamazaki, F. (1980). Cyclic simple shear tests on saturated sand in multidirectional loading. Soils Found, (1)20,45-49.
- [8] Itasca. (2024). Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions, Version 9. Minneapolis, Minnesota, USA: Itasca Consulting group.
- [9] Jiang, M. Kamura, A. Kazama, M. (2021). comparison of liquefaction behavior of granular material under SH-and Love-wave strain conditions

مقادیر اختلاف فاز، مقدار بیشینه اضافه فشار حفره‌ای بیشتر از مقدار مشاهده شده در موج تک سویه است.



شکل ۱۶: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به اختلاف فاز امواج دوسویه

۶- نتیجه گیری

پدیده روانگرایی خاک‌های دانه‌ای تحت بارهای لرزه‌ای برشی سیکلی باعث آسیب در سازه‌های سطحی و همچنین زیرزمینی شده است که اهمیت موضوع و نیاز به مطالعات بیشتر در این زمینه را روشن کرده است. یکی از مهم‌ترین عوامل در روانگرایی خاک‌های دانه‌ای، انتشار امواج برشی سیکلی به سطح زمین است. این امواج باعث کاهش ضریب مقاومت سیکلی خاک شده و پتانسیل روانگرایی را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه زمین لرزه ذاتاً ماهیت چندسویه دارد و در زمین لرزه‌ها مشاهده است، اما مطالعات محدودی در این زمینه توسط محققین صورت گرفته که در این مطالعه تأثیر اختلاف فاز امواج دوسویه برشی بر روند اضافه فشار آب حفره‌ای و نشست سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج زیر حاصل شد.

- ۱- با افزایش مقدار اختلاف فاز میزان بیشینه نشست کاهش می‌یابد و مقدار بیشینه نشست در اختلاف فاز صفر درجه مشاهده می‌شود.
- ۲- برای تمام مقادیر اختلاف فازها، مقدار نشست بیشتر از لرزش تک سویه است که با افزایش اختلاف فاز، اختلاف نشست بین لرزش دوسویه و تک سویه کاهش می‌یابد.
- ۳- با افزایش اختلاف فاز مقدار بیشینه اضافه فشار حفره‌ای کاهش یافته است.

- [14] Reyes, A. Adinata, J. Taiebat, M. (2019) . Impact of bidirectional seismic shearing on the volumetric response of sand .Soil Dynamics and Earthquake Engineering ,125 ,105665
- [15] Reyes, A. Adinata, J. Taiebat, M.(2019) . Liquefaction hazard evaluation under bidirectional seismic shearing: Optimal ground motion intensity measures .VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering ,Rome, Italy.
- [16] Su, D. Li, X. (2008) .Impact of multidirectional shaking on liquefaction potential of level sand deposits .Geotechnique,(4)58 ,259-67.
- [17] Wolf, J. (1985) .Dynamic Soil-Structure Interaction .New Jersey, Prentice Hall, Inc.: Englewood Cliffs.
- [18] Zhang, J.-M. Wang, R. (2024). Large post-liquefaction deformation of sand: Mechanisms and modeling considering water absorption in shearing and seismic wave conditions. Underground Space, 18, 3-64.
- by 3D DEM .soils and Foundations, 61(5), 1235–1250 ,(5)61 ,1235-1250.
- [10] Kammerer, A. Pestana, J. Seed, R. (2002) . Undrained response of monterey 0/30 sand under multidirectional cyclic simple shear loading conditions .California: Berkeley University of of California.
- [11] Li, Y. Luo, C. Zhang, J. Liu, F .Wang, R. (2022) .Rayleigh Wave-Shear Wave Coupling Mechanism for Large Lateral Deformation in Level Liquefiable Ground .Computers and Geotechnics , 143 ,104631.
- [12] Men, F. (1992) .Wave propagation in saturated soil layer and sand liquefaction .collected Research papers in Earthquake Engineering .Beijing: Seismology Press (in Chinese).
- [13] Pyke, R. Seed, H. Chan, C. (1975) . Settlement of sands under multidirectional shaking . Geotechnical engineering ,101(GT4), 379-98.