

مطالعه اثرات اندازه ذرات بر رفتار پیش‌لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی متشکل از خاک‌های دانه‌ای خشک بد دانه‌بندی شده

یزدان شمس ملکی*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه

دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۲۱، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۸/۲۱

چکیده

رفتار پیش‌لرزه‌ای دپوهای طبیعی و خاکریزهای مصنوعی متشکل از مصالح دانه‌ای به شدت تابع وضعیت دانه‌بندی آن‌هاست. در این مقاله مدل‌های فیزیکی کوچک-مقیاس ساخته شده از مصالح دانه‌ای خشک، از نوع ماسه و شن بددانه‌بندی شده با چگالی نسبی کم تا متوسط مابین ۲۰٪ تا ۶۰٪ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه، مدل‌های فیزیکی لایه خاکریز دانه‌ای به کمک ابزار دقیق، برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی تجهیز شده‌اند. اثر اجتناب‌ناپذیر سختی بالای مرزهای مصنوعی در مدل‌سازی‌های فیزیکی، یعنی دیواره‌های جعبه صلب بر پاسخ‌های فرکانسی محاسبه شده است. حسگرهای شتاب برای کنترل اثرات دانه‌بندی و چگالی نسبی بر مقادیر فرکانس‌های طبیعی در ارتفاع مدل خاکریز نصب شده‌اند. از روش پالس ضربه و استخراج توابع تاریخچه زمانی و طیفی شتاب جهت برآورد پاسخ‌های فرکانس طبیعی خاکریز با مصالح دانه‌ای مختلف، استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات خاک دانه‌ای بددانه‌بندی شده و کاهش ناگزیر چگالی نسبی آن در یک انرژی تراکمی یکسان، مقادیر فرکانس طبیعی (تشدید) آن کاهش می‌یابد. همچنین در بین عوامل هندسی مدل، اثر ارتفاع مدل فیزیکی بر فرکانس طبیعی، بیشتر از اثرات طول و عرض مدل است. رابطه ریاضی وابستگی فرکانس طبیعی مدل به اندازه میانگین ذرات مصالح دانه‌ای به شکل سهموی واسنجی شده است.

کلیدواژه‌ها: خاکریز دانه‌ای، فرکانس طبیعی، مدل فیزیکی، مدل پیش‌لرزه‌ای، اندازه ذرات.

۱- مقدمه

مطالعه رفتار لرزه‌ای و پیش-لرزه‌ای لایه‌های خاکریز مهندسی به عنوان بستر احداث سازه‌های مختلف یا بخشی از بدنه راه‌ها و سدهای خاکی، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. لایه‌های خاکریز می‌توانند متشکل از مصالح دانه‌ای همانند شن و ماسه، مصالح چسبیده همانند رس یا ترکیبی از این مصالح باشند. اما در این میان، به‌طور کلی میزان مقاومت و سختی مصالح دانه‌ای مستقیماً تابعی از شکل و اندازه ذرات آن‌ها و نیز نوع قفل و بست و اتصال بین ذره‌ای این نوع خاک‌هاست. میزان چگالی و چگالی نسبی مصالح دانه‌ای، دو عامل اساسی تعیین رفتار لرزه‌ای آن‌ها هستند (Muir wood, ۲۰۰۴).

در این نوع خاک‌ها، سختی خاک تابعی مستقیم از وضعیت تنش‌های سربار روی خاک است و تنش‌های محصورکننده^۱ در اعماق مختلف، نقش مهمی در رفتار باربری کلی خاک دارند

(Wood, ۲۰۰۴). از سوی دیگر، یکی از روش‌های کاربردی شبیه-سازی رفتارهای پیش-لرزه‌ای و لرزه‌ای خاک‌های دانه‌ای، استفاده از روش مدل‌سازی میدانی یا فیزیکی در مقیاس‌های مختلف است (Dezi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Capatti و همکاران، ۲۰۱۸؛ Kramer, ۱۹۹۶).

مشخصه اصلی رفتار پیش‌لرزه‌ای مصالح خاکی، موضوع استعداد بروز ارتعاشات و ارزیابی شرایط فرکانس‌های طبیعی توده خاک است. تا به حال در حوزه‌های مختلف مهندسی عمران، فرکانس‌های طبیعی بارها توسط روش‌های مرسوم عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. اما متأسفانه تا حدودی سهم مدل‌های ژئوتکنیکی در مطالعات آزمایشگاهی استخراج فرکانس‌های طبیعی و تعیین پاسخ تحلیل‌های ارتعاش آزاد-مودال^۲ ناچیز است و اغلب پژوهش‌ها به بررسی المان‌های سازه‌ای و به‌ویژه ارتعاش آزاد تیرها معطوف شده است. برای مثال در تحلیل ارتعاش آزاد (فرکانس طبیعی) سازه‌های ساختمانی

۲۰۱۸؛ Altunisik و همکاران، ۲۰۱۹؛ روشن‌روان و همکاران، ۱۳۹۵؛ بایبوردی و مجتهدی، (۱۳۹۵).
به‌عنوان یک ضرورت اساسی، یافتن صحیح توزیع فرکانسی و نیز فرکانس‌های طبیعی مدل‌های فیزیکی در تحلیل‌های پیش- لرزه‌ای کمک شایانی به اجرای موف مدل‌سازی‌های لرزه‌ای در میدان شتاب 1g (برای مثال مدل‌های میز لرزان) خواهد کرد. اولین مزیت اساسی آن انتخاب بارگذاری‌های لرزه‌ای (شتاب) ورودی با فرکانس غالب کاملاً مناسب است، به‌طوری که باعث بروز پدیده‌های مخربی همچون تشدید یا بزرگ‌نمایی بیش از حد پاسخ‌های لرزه‌ای، در مدل‌سازی‌های فیزیکی نشود. به همین منظور در این تحقیق مطالعه رفتار فرکانسی مدل‌های پیش-لرزه-ای خاکریز لایه‌ای ساخته شده از خاک‌های دانه‌ای در جعبه صلب مدل‌سازی فیزیکی به‌عنوان یک ضرورت و گام اولیه مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع هر چقدر شناخت محققین از رفتار پیش لرزه‌ای مدل‌های فیزیکی بیشتر و عمیق‌تر باشد، تحلیل نتایج نهایی بارگذاری‌های لرزه‌ای اصلی، آسان‌تر و ملموس‌تر خواهد بود.

۲- معرفی برنامه انجام آزمایش‌ها و اجرای مدل‌های فیزیکی متشکل از لایه خاک‌های دانه‌ای

هدف این مطالعه اندازه‌گیری مقادیر فرکانس طبیعی ارتعاش لرزه‌ای ستون خاک کوچک-مقیاس در مدل‌های فیزیکی با لحاظ اثرات سختی جداره‌های مدل است. در واقع در مدل‌سازی‌های فیزیکی، اثر نامساعد جداره‌های خارجی سخت در پیرامون جعبه مدل‌سازی خاک، به‌شکل مرزهای مصنوعی و اجتناب‌ناپذیر عمل می‌کنند. معمولاً دیواره‌ها از جنس مصالحی ساخته می‌شوند، که سختی بسیار بیشتری نسبت به غالب انواع خاک‌ها و منجمله خاک‌های ماسه‌ای و شنی دارند. در این تحقیق، مدل فیزیکی کوچک-مقیاس کوچک و بزرگ زمین مسطح متشکل از مصالح دانه‌ای ماسه‌ای و شنی به‌کمک حسگرهای شتاب پیزوالکتریک با حساسیت خیلی خوب برابر 1000 mv/g ابزاربندی شده است. جهت بررسی اثر اندازه ذرات خاک ماسه‌ای بر پاسخ فرکانس طبیعی مدل فیزیکی کوچک-مقیاس، چهار نوع دانه‌بندی مختلف برای خاک ماسه‌ای شامل دانه‌بندی ریز، متوسط، درشت و خیلی درشت (یعنی خاک شنی) در حالت بددانه‌بندی شده (به‌دلیل استعداد ناپایداری و ضعف مقاومتی، سختی و تراکمی بیشتر در مقایسه با خاک‌های خوب دانه‌بندی شده) از ماسه‌ها و شن‌های شکسته آهکی (تیزگوشه) در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، برای به‌حساب آوردن اثرات اندازه ذرات و تراکم نسبی خاک بر مقادیر فرکانس‌های ارتعاش آزاد مدل ستون خاک، از مدل فیزیکی

مختلف (Zalka, ۲۰۰۱؛ Hu و همکاران، ۲۰۲۰؛ Hente و همکاران، ۲۰۱۹؛ Leng و همکاران، ۲۰۱۷؛ Bartilson و همکاران، ۲۰۲۰؛ Chellapandi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Sinha، ۲۰۲۰؛ Tomasiello، ۲۰۱۱) یا برای بررسی رفتار ارتعاش آزاد در تیرها به‌عنوان اعضای خمشی در سازه‌ها (Fei و همکاران، ۲۰۲۱؛ Brøns و Thomsen، ۲۰۱۹؛ Nicoletti، ۲۰۲۰؛ Noolvi و Nagaraj، ۲۰۲۰؛ Ding و همکاران، ۲۰۱۷؛ Lee و Lee، ۲۰۱۸) و نیز جهت تعیین عیوب تیرها شامل ردیابی وقوع ترک‌ها و گسیختگی‌های سازه‌ای در آن‌ها (برای نمونه در مطالعات Yan و Zhang، ۲۰۱۷؛ Shifrin و Lebedev، ۲۰۲۰؛ Dahak و همکاران، ۲۰۱۷؛ Elshamy و همکاران، ۲۰۱۸؛ Rudesh و Shraavan، ۲۰۱۶) موضوع فرکانس‌های طبیعی بارها توسط روش‌های آزمایشگاهی گوناگون مورد محاسبه تجربی و میدانی قرار گرفته‌اند.

از علل عمده این موضوع، به دشواری زیاد اجرای مدل‌های آزمایشگاهی و فیزیکی در مصالح خاکی و عدم قطعیت‌های مختلف حاکم بر آن‌ها در مقایسه با دیگر سازه‌ها و محیط‌های مصالح می-توان اشاره کرد. خوشبختانه در سال‌های اخیر در حوزه مطالعات ژئوتکنیکی نیز مبحث ارتعاشات آزاد و اندازه‌گیری فرکانس‌های تشدید و طبیعی مورد توجه محققین قرار گرفته است و میدانی و آزمایشگاهی ارزنده‌ای در این زمینه انجام شده است (Dezi و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳؛ Capatti و همکاران، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰).

در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و فیزیکی، مبنای انتخاب مقیاس مدل‌سازی می‌تواند نسبت هندسی بین مدل و نمونه واقعی^۳ (پروتوتایپ) باشد (Wood، ۲۰۰۴).

علاوه بر نسبت‌های هندسی، موضوع نسبت میدان‌های شتاب مدل‌سازی فیزیکی (1g یا ng)، وضعیت تنش- کرنش و چگالی مصالح مدل و نمونه واقعی (اصلی) نیز از دیگر عوامل تعیین‌کننده در مدل‌سازی‌های فیزیکی هستند (Kramer، ۱۹۹۶؛ Wood، ۲۰۰۴).

برای نیل به این هدف، می‌بایستی مدل فیزیکی خاکریز لایه‌ای با مقیاس مناسبی درون یک جعبه صلب یا انعطاف‌پذیر مدل‌سازی شود (Wood، ۲۰۰۴).

جعبه مدل‌سازی فیزیکی هم می‌تواند صلب یا انعطاف‌پذیر باشد (Wood، ۲۰۰۴). در تحقیقات ارزشمند مرتبط با مباحث مکانیک اجسام جامد و تحلیل سازه‌ها، کاربرد اصلی و هدف عمده از تعیین پاسخ‌های فرکانس طبیعی، به‌منظور برآورد اثرات برخی ناپیوستگی‌های ساختاری، ترک‌ها و ریزترک‌ها و نیز شناسایی‌های مودال در این ساختارها است (Niu، ۲۰۲۱؛ Sun و همکاران،

۲-۱- معرفی مشخصات مدل‌های فیزیکی

برای اجرای مدل‌سازی‌های فیزیکی تحقیق از ابعاد کوچک-مقیاس استفاده شده است. جعبه شفاف کوچک-مقیاس مدل ۱ دارای ابعاد دقیق $40 \times 30 \times 20$ cm و جعبه صلب فلزی بزرگ‌تر مدل ۲ دارای یک دیواره پیشین شفاف و ابعاد مفید داخلی دو برابر جعبه کوچک‌تر و برابر $80 \times 60 \times 40$ cm است. در حجم ثابت جعبه-های صلب مدل‌سازی فیزیکی لایه خاک دانه‌ای، چگالی نسبی مدل خاک از ۲۰٪ (برای شن ریز) تا ۶۰٪ (برای ماسه ریزدانه) متغیر است. جدول (۱) مشخصات تراکمی خاک‌های دانه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌ها و جدول (۲) مشخصات فیزیکی (به کمک منحنی‌های دانه‌بندی) آن‌ها را معرفی می‌کند. بخشی از اطلاعات این جداول از طریق اندازه‌گیری‌های استاندارد آزمایشگاهی (ASTM، ۱۹۹۹) و بعضی از مقادیر دیگر توسط محاسبه با روابط مرجع معتبر (Wood، ۲۰۰۴) انجام شده است.

مطابق جدول (۱) با افزایش اندازه ذرات خاک‌های دانه‌ای مقادیر نسبت تخلخل حاضر (موجود) آن‌ها در مدل‌های فیزیکی، کاهش یافته، اما بایستی توجه اکید نمود که این کاهش با توجه به مقدار بیشینه نسبت تخلخل هر مورد در جدول برای خاک‌های درشت‌دانه‌تر، در جهت افزایش نسبت تخلخل تا حد آستانه تخلخل بیشینه و کاهش بسیار زیاد چگالی نسبی آن‌هاست. در واقع این بدان مفهوم است که کمترین میزان تخلخل حاضر در جدول ۰/۵۷۵ برای خاک شنی نسبت به نوع خاک و بیشینه نسبت تخلخل آن، به‌صورت نسبی بالاترین مقدار است.

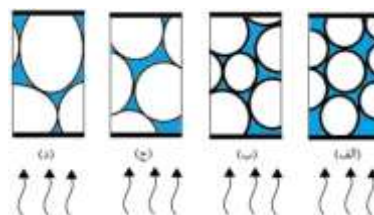
جدول ۱- مشخصات تراکمی خاک‌های دانه‌ای در آزمایش‌ها

مقادیر برای انواع مختلف خاک دانه‌ای (ماسه/شن)				مشخصه تراکمی اصلی
شن GP	درشت SP	متوسط SP	ریز SP	ماسه یا شن بر اساس معیار USCS
۲/۱۲	۲/۰۲	۱/۹۸	۱/۸۷	چگالی خشک بیشینه (اندازه‌گیری شده) (γ_{dmax} : gr/cm ³)
۱/۶۵	۱/۴۵	۱/۳۷	۱/۱۸	چگالی خشک کمینه (اندازه‌گیری شده) (γ_{dmin} : gr/cm ³)
۱/۷۴	۱/۶۸	۱/۶۴	۱/۵۲	چگالی خشک حاضر خاک (γ_a : gr/cm ³)
۰/۶۴۸	۰/۸۵۵	۰/۹۴۹	۱/۲۴۶	نسبت تخلخل بیشینه (محاسبه شده) (E_{max})
۰/۲۸۳	۰/۳۳۲	۰/۳۴۸	۰/۴۱۷	نسبت تخلخل کمینه (محاسبه شده) (E_{min})
۰/۵۷۵	۰/۶۰۱	۰/۶۲۸	۰/۷۴۳	نسبت تخلخل موجود (e)
۲/۷۲	۲/۶۹	۲/۶۷	۲/۶۵	چگالی ویژه ذرات G_s
۲۰/۱۰۰	۴۸/۵۶۶	۵۳/۴۱۱	۶۰/۶۷۶	چگالی نسبی D_R (%)

مطابق شکل (۳) چهار حالت فضای بین ذره‌ای (حجم حفره-ای) برای یک خاک دانه‌ای خشک بدانه‌بندی شده مشخص (با افزایش اندازه ذرات در حجمی ثابت) تحت تأثیر ارتعاشات لرزه‌ای پایه (کف لایه) ترسیم شده است. مطابق این شکل و مقادیر نسبت تخلخل بیشینه و کمینه جدول (۱)، هر چه اندازه میانگین ذرات خاک دانه‌ای بزرگ‌تر می‌شود، در یک انرژی تراکمی یکسان، میزان حفرات کاهنده تراکم (چگالی نسبی) و سختی کل توده خاک هم کاهش می‌یابد. یعنی در حالتی که خاک درشت‌دانه‌تر شده بایستی به‌طور طبیعی سختی بیشتری داشته باشد، که به‌دلیل حفرات کمتر، سختی مجموع آن به‌مراتب بیشتر از خاک دانه‌ای هم حجم ریز معادل آن است. افزون بر این، در سال‌های اخیر در مطالعات ارزنده‌ای اثرات اندازه ذرات (شریفی و همکاران، ۲۰۲۰) و شکل ذرات (پایان و همکاران، ۲۰۱۶) خاک‌های دانه‌ای همانند ماسه بر مشخصه‌های دینامیکی آن‌ها از قبیل سرعت موج برشی V_s و مدول برشی دینامیکی بیشینه G_{max} ، در چارچوب مطالعات آزمایشگاهی ارزیابی شده است. جهت بررسی بیشتر اثرات بنیادین هندسه ذرات خاک دانه‌ای بر پارامترهای دینامیکی آن‌ها، می‌توان به این مقالات مراجعه نمود.

برحسب شکل (۳-الف) در خاک دانه‌ای ریز بدانه‌بندی شده به‌علت عدم وجود ذرات پرکننده ریزتر، فضاهای خالی بین ذرات بزرگ‌تر، به‌نحو مناسبی پر نمی‌شوند، حال آن‌که در خاک دانه‌ای درشت‌دانه فاقد ذرات پرکننده ریزدانه، فقط اتکای دانه‌ها به‌هم، روند تراکم را تکمیل می‌کند، که منجر به تشکیل (نسبت) تخلخل و فضاهای خالی کوچک‌تر و کمتری (تا آستانه نزدیک به نسبت تخلخل کمینه) در بافت کلی خاک می‌شود (Wood، ۲۰۰۴).

به‌طور اساسی مطابق مطالعات آزمایشگاهی معتبر، اختلاف بین تخلخل کمینه و بیشینه خاک‌های دانه‌ای با افزایش میانگین اندازه ذرات D_{50} این‌گونه خاک‌ها کاهش می‌یابد (Cubrinovski و Ishihara، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲). این ترسیم‌ها در حالت ذرات ایده‌آل کروی-بیضوی شکل انجام شده است. بدیهی است که برای خاک-های دانه‌ای شکسته (تیز گوشه) همین شرایط تخلخلی به‌طور مشابهی برقرار است، با این تفاوت که شکل حفرات بین ذرات و هندسه خود ذرات به‌طور اساسی متفاوت خواهند بود.



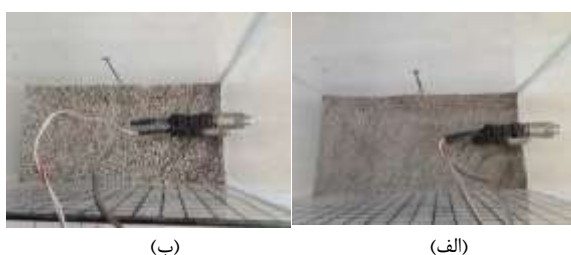
شکل ۳- حالت ایده‌آل فضاهای خالی در حجم یکسانی از خاک

دانه‌ای بدانه‌بندی شده با اندازه ذرات متفاوت شامل ماسه:

(الف) ریز، (ب) متوسط (مخلوط)، (ج) درشت، (د) شن

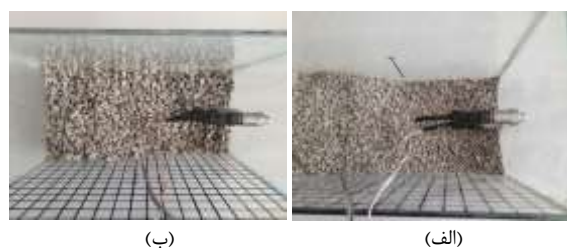
۲-۲- بررسی جزئیات مدل‌های فیزیکی

در مدل‌سازی‌های فیزیکی سعی بر آن بوده است که بیشتر پارامترهای مدل منطبق بر روابط تشابه ابعادی باشند (Iai، ۱۹۸۹؛ Wood، ۲۰۰۴) و این روابط تا حد امکان به خوبی اکتفا شوند. نحوه نصب حسگرهای شتاب به صورت متکی به بدنه و دیواره‌های جعبه صلب مدل‌سازی بوده است. به این منظور اثرات اتکای حسگر شتاب به بدنه جعبه، در برآورد پاسخ‌های شتاب ضربه مورد تجزیه و تحلیل کمی و کیفی قرار گرفته است. شکل (۴) چگونگی نصب حسگرهای شتاب در جعبه کوچک-مقیاس مدل‌سازی ستون خاک ماسه‌ای در حالات جعبه حاوی ماسه ریز (شکل (۴-الف)) و ماسه متوسط (شکل (۴-ب)) را نشان می‌دهد.



شکل ۴- چیدمان حسگرهای شتاب در جعبه کوچک حاوی:
(الف) ماسه ریز، (ب) ماسه متوسط

همچنین شکل (۵) به‌طور مشابهی مدل شامل ماسه درشت (شکل (۵-الف)) و شن (شکل (۵-ب)) را نمایش می‌دهد. برای درک بهتر موقعیت و شکل نصب حسگرهای شتاب، تمامی تصاویر مدل‌های مختلف این مطالعه در حالت پرنشده (در حین پرسیدن) ارائه شده‌اند. از طرفی برای جلوگیری از بازگشت یا انعکاس نامناسب امواج حاصل از ضربه، در حین اعمال ضربه به بدنه جعبه، تمامی بدنه خارجی جعبه توسط بلوک‌های لایه‌ای (ورقه‌ای) پلی‌استایرنی و لایه فومی با مجموع ضخامت حداقل ۲ تا حداکثر ۵ سانتی‌متر پوشانده شده است. علاوه بر مدل‌های ماسه درشت در جعبه کوچک-مقیاس مدل ۱، مدل ۲ شامل جعبه بزرگ‌تر با ابعاد دو برابر ابعاد جعبه مدل ۱ نیز مطابق شکل (۶) مورد آزمایش قرار گرفته است.



شکل ۵- چیدمان حسگرهای شتاب در جعبه کوچک حاوی:
(الف) ماسه درشت‌دانه، (ب) شن ریز

علت لحاظ تغییرات تراکم نسبی مصالح در جدول (۱) (در قبل) از ۲۰٪ تا ۶۰٪ به علت خاصیت طبیعی این خاک‌های دانهای در حین مدل‌سازی فیزیکی در جعبه‌های کوچک تا (حتی) بزرگ است. در واقع در حجم ثابت جعبه و در یک تلاش (انرژی) تراکمی یکسان، این نتایج متفاوت به دست آمده است. اگر تلاش تراکمی برای یکسان‌سازی هرچه بیشتر مقادیر چگالی‌های نسبی افزایش یابد، منجر به خردشدگی ذرات خاک‌های درشت‌دانه و به هم خوردن الگوهای اولیه دانه‌بندی آن‌ها می‌شود.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی خاک‌های دانهای در آزمایش‌ها

مشخصه فیزیکی اصلی	مقادیر برای انواع مختلف خاک دانهای (ماسه/شن)		
طبقه‌بندی ماسه/شن بر اساس معیار USCS*	ماسه ریز (مخلوط) SP	ماسه متوسط (مخلوط) SP	شن ریز (بدون ریزدانه) GP
قطر مؤثر ذرات (D_{10} :mm)	۰/۳۸	۰/۲۸	۲/۱۰
کوچک‌ترین اندازه ذرات D_{min} (mm)	۰/۱۲	۰/۲۰	۱/۰۰
بزرگ‌ترین اندازه ذرات D_{max} (mm)	۱/۵۰	۲/۳۰	۱۰/۲۰
قطر D_{30} (mm)	۰/۶۰	۰/۷۰	۳/۵۰
قطر میانگین ذرات (D_{50} : mm)	۰/۷۵	۱/۷۰	۶/۰۰
قطر D_{60} (mm)	۰/۹۰	۲/۶۰	۷/۶۰
ضریب یکنواختی ^۱ (C_u)	۲/۳۷	۹/۲۸	۳/۶۲
ضریب انحناء ^۲ (C_c)	۱/۰۵	۰/۶۷	۰/۷۷

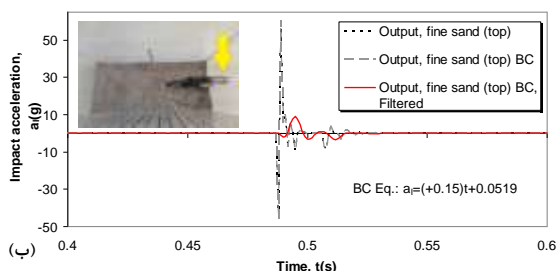
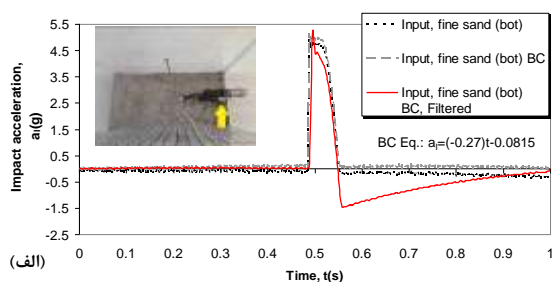
* USCS: Unified soil classification system

^۱ Coefficient of uniformity: ($C_u = D_{60} / D_{10}$).

^۲ Coefficient of gradation or curvature: ($C_c = D_{30}^2 / (D_{60} * D_{10})$).

هدف از انتخاب ابعاد کوچک-مقیاس دوگانه بررسی تأثیر تغییر مقیاس هندسی مدل‌سازی بر نتایج نهایی مدل‌های با ابعاد کوچک بوده است. مدل‌های کوچک-مقیاس شامل مدل ۱: مدل لایه زمین مسطح ماسه‌ای / شنی با ابعاد یک‌صدم ابعاد واقعی (لایه خاک واقعی با ضخامت ۲۰ متر و مدل ۰/۲ متری) است (مقیاس ۱:۱۰۰). و مدل ۲: مدل کوچک-مقیاس بزرگ‌تر شامل مدل کاهش یافته تا ابعاد یک ۳۰م مدل واقعی (لایه خاک واقعی با ضخامت ۱۲ متر و مدل ۰/۴ متری) است (مقیاس ۱:۳۰). برای مقیاس کردن مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی (لرزه‌ای) مدل‌ها همانند زمان، فرکانس، سرعت امواج (برشی و فشاری) و ... می‌توان از روابط تشابه ابعادی پیشنهادی مطرح شده توسط مراجع معتبر (Iai ۱۹۸۹) و Wood (۲۰۰۴) استفاده کرد. همچنین سختی خاک ماسه‌ای به‌عنوان تابعی از سطح تنش‌های سربار قابل مقیاس کردن است.

است. علاوه بر گسترش و تغییر جهت شتاب در ارتفاع دیواره جعبه، بزرگ‌نمایی مشهودی نیز در مقادیر آن ایجاد شده است. همان‌گونه که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌گردد فیلتر فرکانسی باندگذر اثر ناچیزی بر کاهش دامنه زمانی شتاب ضربه ورودی داشته است، حال آن‌که همین فیلتر دامنه شتاب پاسخ در بالای لایه خاک داخل جعبه (شکل (۷-ب)) را بسیار کاهش داده است.



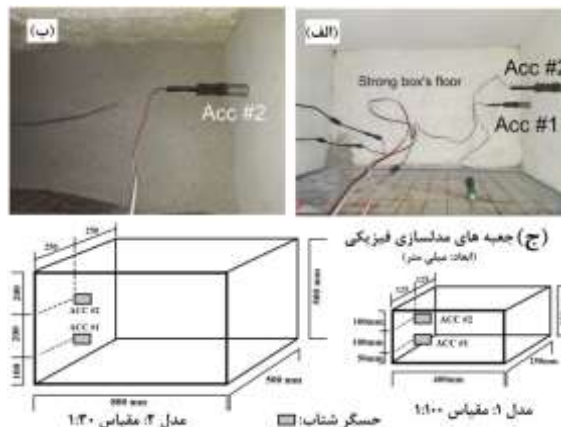
شکل ۷- پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه حاوی ماسه ریزدانه: (الف) شتاب ورودی، (ب) شتاب پاسخ

با توجه به حذف اثرات موج فشاری P توسط این فیلتر، این مقدار کاهش دامنه، اثرات مشهود ایجاد موج‌های لرزه‌ای اولیه P و مدت زمان کوتاهی پس از آن، تولید ناگزیر امواج برشی (ثانویه) S را به‌خوبی اثبات می‌کند. یعنی در ارتفاع مدل خاکریز کوچک-مقیاس موج لرزه‌ای اولیه و ثانویه شکل گرفته است و دامنه موج فشاری در اثر انتشار در ارتفاع مدل، به‌طور طبیعی دچار تقویت و بزرگ‌نمایی مشهودی شده است.

در مورد ماسه با اندازه دانه‌های متوسط نتیجه شکل (۸-الف) ثابت می‌کند پاسخ شتاب ورودی (حسگر پایینی) کمتر تحت تأثیر اثرات فرکانس بالا قرار گرفته است و نشانه آن نیز عدم افزایش چشمگیر دامنه زمانی شتاب است. در واقع اختلاف بین پاسخ فیلتر شده و فیلتر نشده در این مورد ناچیز است و شاید حتی حرکت ورودی (در پایین لایه) نیاز به فیلتر کردن فرکانسی هم نداشته باشد.

علت این مسأله آن است پاسخ ورودی از حسگر پایینی که دقیقاً نزدیک به محل ضربه است استخراج شده و هنوز مقدار قابل

این مدل منحصرأ از ماسه ریز بددانه‌بندی شده تشکیل شده است. مقایسه ابعاد جعبه‌های مدل ۱ و ۲ و موقعیت نسبی استقرار حسگرهای شتاب در شکل (۶-ج) به‌صورت شماتیک ارائه شده است.



شکل ۶- چیدمان حسگرهای شتاب در جعبه مدل ۲ مدل‌سازی فیزیکی: (الف) جعبه خالی، (ب) جعبه با مدل ماسه ریز، (ج) ابعاد جعبه‌های مدل ۱ و ۲ و موقعیت حسگرها

۳- مطالعه خروجی‌های اولیه آزمون‌های ضربه

در شکل (۷) نمودار تاریخچه زمانی تحریک ضربه ورودی (شکل (۷-الف)) و پاسخ ضربه در سطح خاک (شکل (۷-ب)) داخل جعبه ترسیم شده است. این نمودار در دو حالت بدون اصلاح خط پایه^{۱۰} BC و با اصلاح خط پایه ارائه شده است. جهت اصلاح خط پایه معادله‌ای ساده و خطی در هر مورد به‌کار گرفته شده است که رابطه ریاضی آن (یعنی BC Eq: Base-line Correction Equation) درون نمودارها آورده شده است. علاوه بر اصلاح خط پایه، یک فیلتر فرکانسی از نوع باثروث^{۱۱} باندگذر با تنظیم مرتبه^{۱۲} ۴ بین فرکانس‌های ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز (کسر اختلاف فرکانسی ۱۰۰۰ هرتزی) برای حذف اثرات نویز فرکانس بالا به داده‌های حسگرهای شتاب اعمال شده است. در آزمایش‌های ارتعاشی همانند آزمون ضربه، معمولاً امواج اولیه یا فشاری ناشی از ضربه دارای سرعتی بیش از امواج ثانویه یا برشی هستند. امواج فشاری دارای محتوای فرکانسی بالایی هستند که بایستی از اندازه‌گیری‌ها حذف شوند.

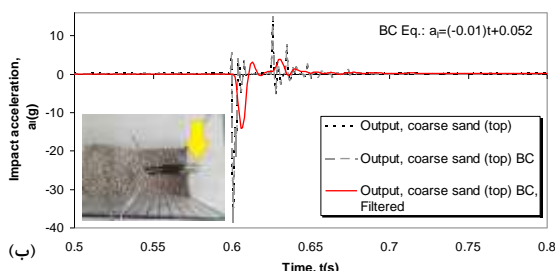
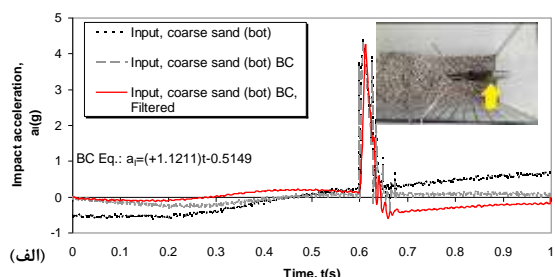
امواج فشاری P علاوه بر محتوای فرکانسی بالا در دامنه فرکانس، دامنه‌های شتاب پاسخ بزرگ ناخواسته‌ای نیز در حوزه زمان به‌صورت نویز- اختلال ایجاد می‌کنند (Dezi و همکاران، ۲۰۱۲). مطابق شکل (۷) در حالت خاک ماسه‌ای ریزدانه شتاب ورودی تک‌دامنه ضربه اعمالی به یک شتاب دو دامنه تبدیل شده

12. Filter order

10. Uncorrected base-line

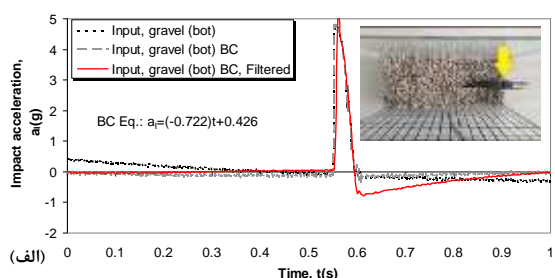
11. Butterworth band-pass filter

ارتعاشی قائم و انتشار موج، علت اصلی تفاوت در پاسخ‌های خام^{۱۴} و فیلترشده دو نقطه بالایی و پایینی تمامی مدل‌هاست.

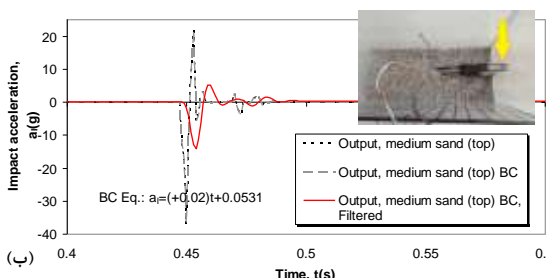
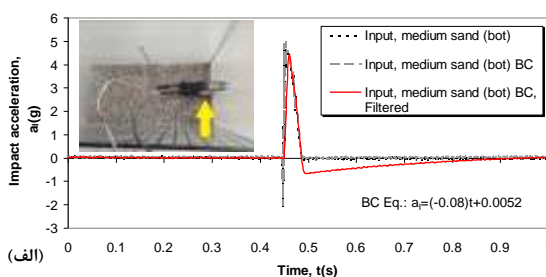


شکل ۹- پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه حاوی ماسه درشت
دانه: الف) شتاب ورودی، ب) شتاب پاسخ

در شکل (۱۰) پاسخ شتاب ضربه در پایین و بالای لایه خاک شنی ارائه شده است. در مقایسه این شکل با شکل‌های قبلی که مربوط به خاک‌های ماسه‌ای بودند، میزان کاهش دامنه زمانی شتاب پاسخ برای خاک شنی بدانه‌بندی شده کاملاً مشهود است. این کاهش دامنه زمانی حتی در نویزهای فرکانس بالای ناشی از اثر موج فشاری P هم مشهود است (شکل (۱۰-ب)). علت این کاهش به دلیل سختی ذاتی بیشتر ذرات خاک شنی ناشی از افزایش اندازه ذرات آن (به سبب اعمال انرژی تراکمی یکسان) در مقایسه با مدل‌های ماسه‌ای بوده است.



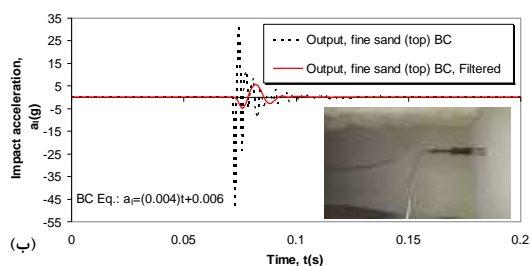
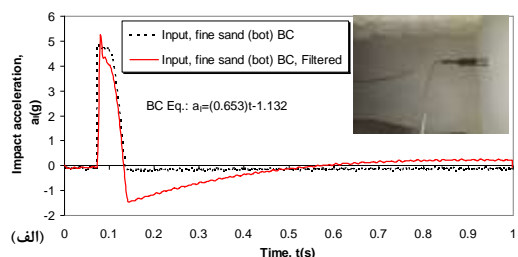
توجهی از مصالح ماسه‌ای و نیز بدنه جعبه در مسیر آن قرار نگرفته- اند، تا بزرگنمایی مشخصی در دامنه امواج آن ایجاد کنند. یعنی در واقع حسگر پایینی محل تولید موج لرزه‌ای (منشأ چشمه موج) است و هنوز انتشار چندانی در موج لرزه‌ای در مصالح جعبه و خاک دانه‌ای صورت نگرفته است. اما برای پاسخ حسگر بالایی در ارتفاع دیواره جعبه، شرایط کاملاً متفاوت است (شکل (۸-ب)). در واقع در حد فاصل بین دو حسگر شتاب موج لرزه‌ای ناشی از ضربه انتشار یافته (انتشار موج تولیدشده) و انتشار اولیه آن نیز به صورت امواج فشاری P با سرعت انتشار، فرکانس ارتعاش و دامنه زمانی شتاب به مراتب بالاتر از امواج برشی S است.



شکل ۸- پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه حاوی ماسه با
دانه‌بندی اندازه متوسط (مخلوط): الف) شتاب ورودی،
ب) شتاب پاسخ

در شکل (۹) پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه حاوی ماسه درشت‌دانه برای شتاب ورودی (حسگر پایینی- شکل (۹-الف)) و شتاب پاسخ (حسگر بالایی- شکل (۹-ب)) مشابه حالات قبلی ارائه شده است. بر این اساس، مقدار شتاب پاسخ در بالای مدل (سطح لایه خاک) نسبت به حالات قبلی کاهش یافته است. علت اصلی رخداد این موضوع، کاهش اجتناب‌ناپذیر میزان چگالی نسبی خاک دانه‌ای درشت‌دانه‌تر در جعبه مدل‌سازی فیزیکی با حجم ثابت بوده است. در این شکل، بازهم فیلتر فرکانسی میان‌گذر به‌ویژه در پاسخ حسگر بالایی، باعث کاهش چشمگیر دامنه^{۱۳} زمانی شتاب ارتعاشی پاسخ شده و نویزهای ناخواسته زیادی را حذف کرده است (شکل (۹-ب)). به‌وضوح علت این موضوع، کاهش اثرات فرکانس بالای موج فشاری اولیه انتشار یافته در اثر اعمال فیلتر است. حرکات

شتاب پاسخ (حسگر بالایی، شکل ۱۲-ب) به نمایش درآمده است. علی‌رغم دو برابر شدن ابعاد داخلی جعبه و تغییر جنس مصالح جعبه از شیشه به فولاد نرمه، بازهم الگوهای مشابهی برای شتاب پاسخ ضربه به دست آمده است. مجدداً پاسخ شتاب حسگر بالایی شامل اثرات نویزگونه انتشار موج اولیه است. نکته مهم آن است که مدل جعبه بزرگتر (۱:۳۰) حاضر هم همان الگوی نتایج مدل جعبه کوچکتر (۱:۱۰۰) را تکرار می‌کند.



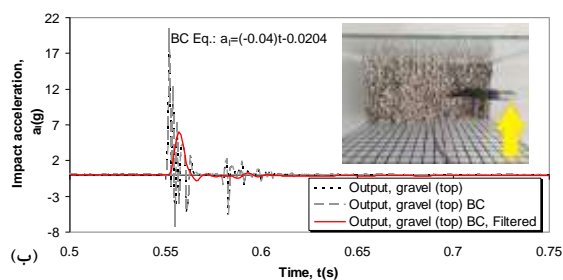
شکل ۱۲- پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه بزرگ‌تر حاوی ماسه ریز: الف) شتاب ورودی (حسگر پایینی)، ب) شتاب پاسخ (حسگر بالا)

۴- بررسی مقایسه‌ای نتایج کلی تحقیق

چنانچه در شکل‌های قبلی مشخص است با افزایش اندازه ذرات خاک دانه‌ای، در تراکم‌های نسبی مختلف و حجم مدل ثابت، میزان بزرگ‌نمایی در مقادیر دامنه شتاب پاسخ کاهش می‌یابد. رخداد این موضوع به‌طور کامل با ادبیات فنی و مراجع موجود سازگاری دارد (Kramer, ۱۹۹۶). از سوی دیگر، به‌طور کلی توده‌های خاکی ریزدانه نسبت به توده‌های درشت‌دانه و سنگی، در حین اعمال ارتعاشات، مقادیر بزرگ‌نمایی بیشتری از خود نشان می‌دهند. توده‌های خاکی سخت و نیز لایه‌های سنگی، پریودهای کوچک متنظر با فرکانس‌های بالا را دچار بزرگ‌نمایی می‌کنند، در حالی که توده‌های خاک نرم، پریودهای بزرگ‌تر (و یا فرکانس‌های کوچک‌تر) را دچار بزرگ‌نمایی می‌کنند (Kramer, ۱۹۹۶).

۴-۱- نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی پیش‌لرزه‌ای

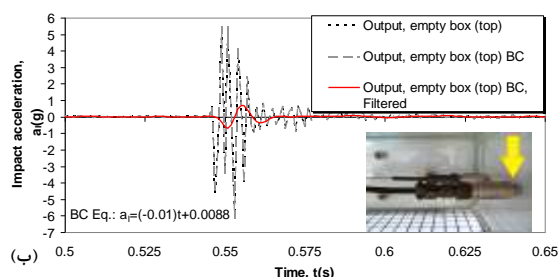
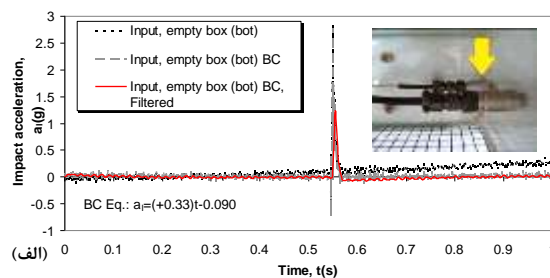
از دیدگاه ژئوتکنیک لرزه‌ای توقع بر آن است که با افزایش سختی مصالح، پریودهای کوتاه‌تر (یعنی فرکانس‌های بزرگ‌تر) توسط این مصالح دچار بزرگ‌نمایی/تشدید شوند (Kramer,



شکل ۱۰- پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه حاوی شن:

الف) شتاب ورودی (بالای لایه)، ب) شتاب پاسخ (پایین لایه)

در شکل (۱۱) پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه خالی کوچک-مقیاس برای شتاب ورودی و شتاب پاسخ در حالات بدون اصلاح خط پایه (داده خام شتاب)، با اصلاح خط پایه و فیلترسازی فرکانسی ارائه شده است. در جعبه خالی ارتعاشات بیش از حد بدنه جعبه (کف و دیواره‌های مقابل هم و محل تقاطع آن‌ها با هم‌کنج‌ها) باعث ایجاد انعکاس و انکسار در موج اولیه فشاری در محل تولید موج (موقعیت حسگر شتاب پایینی) شده است. در شکل (۱۱-الف) افزایش اختلاف دامنه شتاب ورودی در حالات فیلترشده و فیلتر نشده نسبت به حالات قبلی که جعبه پر است، به همین علت اتفاق افتاده است. همچنین مطابق شکل (۱۱-ب) جعبه خالی نویزها و ارتعاشات تصادفی ناخواسته بیشتری در پاسخ شتاب ضربه نسبت به جعبه‌های پر در نقطه حسگر بالایی از خود نشان می‌دهد.

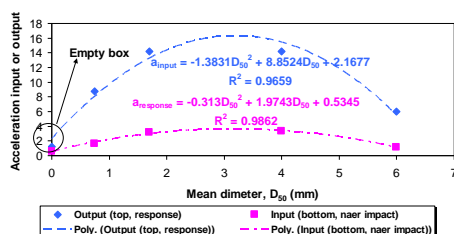


شکل ۱۱- پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه خالی کوچک-

مقیاس: الف) شتاب ورودی (پایین دیواره)، ب) شتاب پاسخ

در شکل (۱۲) پاسخ شتاب ضربه در بدنه جعبه بزرگ‌تر حاوی ماسه ریز شامل شتاب ورودی (حسگر پایینی، شکل ۱۲-الف) و

از طرفی تخلخل بیشتر این مصالح باعث کاهش بزرگ‌نمایی دامنه شتاب پاسخ نسبت به مورد مشابه و نزدیک ماسه درشت‌دانه شده است. در شکل (۱۴) تغییرات شتاب ضربه ورودی و خروجی (پاسخ) در مقابل میانگین قطر ذرات خاک D₅₀ ترسیم شده است. بر اساس این شکل، دامنه شتاب ورودی (در محل ضربه و حسگر پایینی) مقدار کوچک‌تری نسبت به پاسخ حسگر بالایی دارد. علت این موضوع بزرگ‌نمایی ذاتی شتاب در سطح لایه خاک در اثر عمل ذرات آن است. همچنین جعبه خالی کمترین شتاب ورودی و خروجی را در مقایسه با تمام حالات قبلی مدل‌سازی نشان می‌دهد، که به دلیل نبودن مصالح دامنه‌ای در داخل آن است. مطابق این شکل، تغییرات بزرگ‌نمایی شتاب با اندازه میانگین ذرات خاک، تابع یک رابطه ریاضی سهموی است. یعنی با افزایش اندازه ذرات در یک حجم ثابت، مقدار شتاب‌ها تا حدودی افزایش و سپس دوباره کاهش می‌یابد. کاهش دامنه شتاب علی‌رغم افزایش قطر ذرات خاک، به دلیل کاهش سختی خاک به دلیل افزایش تخلخل و کاهش چگالی نسبی آن است. به‌طور کلی متراکم کردن خاک‌های درشت‌دانه همانند شن یا ماسه درشت در حالت خشک یا با رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه، در جعبه‌های کوچک یا حتی بزرگ مدل‌سازی فیزیکی، کاری دشوار و در پاره‌ای موارد تقریباً توأم با موفقیت کمی است.



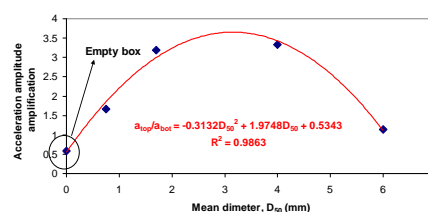
شکل ۱۴- تغییرات شتاب ضربه ورودی و خروجی (پاسخ) در مقابل میانگین قطر ذرات خاک

در این کار، نتایج آزمایش‌های ارتعاش محیطی برحسب چگالی طیفی توان (PSD)^{۱۵} شتاب‌ها ارائه شده‌اند. تابع PSD یک سیگنال ثابت و حقیقی (غیرموهومی) $x(t)$ چگونگی توزیع توان آن سیگنال در محدوده فرکانسی را توصیف می‌کند. می‌توان آن را به‌عنوان تبدیل فوریه خودهمبستگی^{۱۶} (که معیاری برای تشابه بین سیگنال و خود آن با تأخیر زمانی τ است) به‌شکل رابطه انتگرالی زیر به‌دست آورد (Dezi و همکاران، ۲۰۱۲):

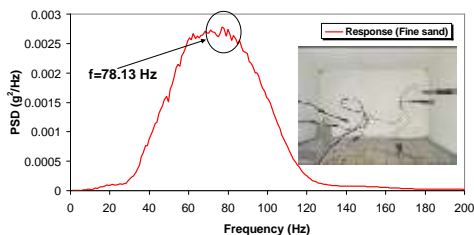
$$PSD(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cdot e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (1)$$

(۱۹۹۶). از سوی دیگر با کاهش سختی مصالح خاکی، دامنه پاسخ‌ها به‌ویژه پاسخ‌های شتاب متناظر با پیوندهای طولانی‌تر (که معادل فرکانس‌های کوچک‌ترند)، دچار بزرگ‌نمایی خواهد شد. اما در مصالح دامنه‌ای مختلف مانند ماسه و شن، به‌غیر از مسأله سخت، موضوع دامنه‌بندی و وضعیت تراکمی نیز بر پاسخ‌های فرکانسی به‌طور غالبی اثرگذارند. چرا که سختی خاک‌ها نیز به نوبه خود تابع دامنه‌بندی، سطح تنش‌های اعمالی بین دامنه‌ای، درجه پیش‌تحکیمی، خواص خمیری و چگالی نسبی مصالح دامنه‌ای است و صرفاً وابسته به جنس این نوع مصالح از نظر ماسه‌ای یا شنی بودن یا حتی اندازه ذرات نیست. یعنی این توقع که مصالح شنی (و یا سنگ‌دانه‌های درشت) به‌علت سختی بیشتر نسبت به مصالح ماسه‌ای، بایستی همواره پیوندهای کوچک‌تر را دچار بزرگ‌نمایی کنند، فقط زمانی اتفاق خواهد افتاد که تراکم مصالح شنی نیز بیشتر از مصالح ماسه‌ای یا نزدیک به آن باشد (Wood، ۲۰۰۴). وگرنه در یک حجم یکسان- ثابت برای مصالح ماسه‌ای و شنی، تأثیر جنس مصالح به تنهایی در میزان بزرگ‌نمایی پاسخ‌های ارتعاشی در مقایسه با موضوع مهم تراکم این نوع خاک‌ها، کم‌اهمیت است.

مطابق شکل (۱۳) رابطه سهمی (درجه دوم و غیرخطی) بین تغییرات قطر متوسط ذرات خاک D₅₀ و بزرگ‌نمایی دامنه زمانی شتاب در ارتفاع جعبه (با دقت مناسب) مشاهده شده است. بر این اساس، به‌طور طبیعی پاسخ جعبه خالی کمترین بزرگ‌نمایی مابین دامنه شتاب ورودی (حسگر پایینی) و خروجی (حسگر بالایی) را آشکار می‌سازد. پس از آن با افزایش اندازه ذرات ماسه، مقدار بزرگ‌نمایی هم افزایش می‌یابد. تا این‌که اندازه ذرات معادل ذرات شنی می‌شوند. در این حالت به‌علت تراکم نسبی کمتر قابل دستیابی ذرات شنی در مدل‌سازی فیزیکی (افزایش نسبی میزان تخلخل- حفرات بین ذره‌ای) و نیز سختی ذاتی بالاتر ذرات آن نسبت به ماسه، در حجم ثابت جعبه صلب مجدداً بزرگ‌نمایی پاسخ دامنه شتاب کاهش پیدا کرده است. در واقع در اینجا سختی بیشتر مصالح شنی نسبت به ماسه‌ها، باعث کاهش دامنه‌های شتاب پاسخ شده است.

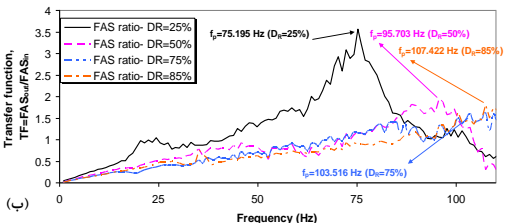
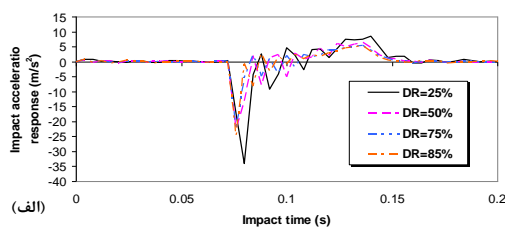


شکل ۱۳- رابطه سهموی بین تغییرات قطر متوسط ذرات خاک و بزرگ‌نمایی دامنه شتاب در ارتفاع جعبه



شکل ۱۶- پاسخ‌های دانسیته طیفی توان ارتعاشات حاصل از ضربه برای ماسه ریزدانه در جعبه بزرگ فولادی پُر شده

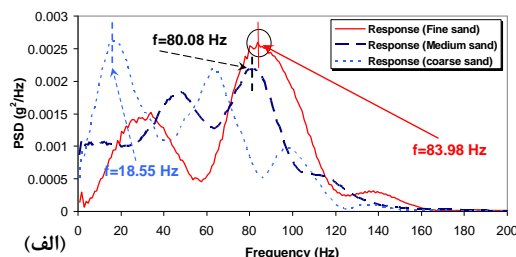
در شکل (۱۷) پاسخ‌های ارتعاش آزاد اندازه‌گیری شده برای مدل‌های فیزیکی ماسه ریز در جعبه مدل ۲ (جعبه بزرگ) در چهار دانسیته نسبی DR مختلف برابر ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۸۵٪ ارائه شده است. برای پالس ورودی جهت تحریک مدل‌های مختلف از همان تابع ضربه قبلی برای مدل ۲ و ماسه ریز در شکل قبلی (۱۲-الف) استفاده شده است. مطابق شکل (۱۷-الف) با افزایش دانسیته نسبی مدل‌ها میزان دامنه شتاب پاسخ ضربه (در حسگر شتاب بالایی) کاهش یافته است. در واقع میزان بزرگ‌نمایی شتاب پاسخ افزایش چگالی نسبی و کاهش تخلخل آن است. با مقایسه پاسخ-های تابع انتقال شکل (۱۷-ب) که همان تابع بزرگ‌نمایی شتاب بر حسب طیف فرکانسی فوریه در حسگر شتاب بالایی (پاسخ خروجی) نسبت به حسگر شتاب پایینی (تحریک ورودی) است، چند نتیجه‌گیری مهم قابل بیان است. نخست آن که با افزایش دانسیته نسبی ماسه ریز، میزان سختی و مقاومت خاک در مدل فیزیکی افزایش یافته، که منجر به کاهش مقادیر بزرگ‌نمایی پاسخ شتاب‌ها شده است.



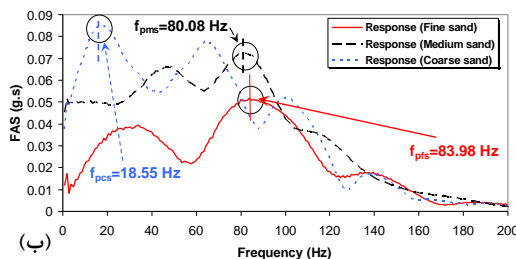
شکل ۱۷- اثر تغییرات چگالی نسبی بر مدل‌های خاک ماسه‌ای ریز شامل: الف) پاسخ شتاب ضربه، ب) تابع انتقال شتاب‌ها

که در رابطه فوق R_x تابع خودهمبستگی سیگنال ارتعاشی، فرانسج i یکه موهومی، f فرکانس و τ زمان (تأخیر) است. در شکل (۱۵-الف) نسبت تابع دانسیته طیفی توان ارتعاش آزاد حسگر شتاب بالایی به حسگر شتاب پایینی برای ۳ نوع خاک ماسه‌ای با اندازه ذرات مختلف ترسیم شده است. این منحنی‌ها همگی در یک بازه فرکانسی وسیع مابین ۰/۱۰ تا ۲۰۰ هرتز رسم شده‌اند. مطابق این شکل با افزایش اندازه ذرات ماسه، مقدار فرکانس غالب مدلی فیزیکی (فرکانس تشدید) کاهش پیدا کرده است. همچنین در شکل (۱۵-ب) پاسخ طیف دامنه فوریه FAS^{۱۷} برای تبدیل فوریه محاسبه شده خروجی‌های پاسخ شتاب در سطح مدل‌های دانه‌ای مختلف ارائه شده است. مطابق این شکل، مقادیر فرکانس غالب خاک‌های ماسه‌ای با اندازه ذرات مختلف حاصل از طیف فرکانسی فوریه در محدوده همان فرکانس‌های مقادیر اوج تابع PSD است، با این تفاوت که مقادیر کمی دامنه‌های دو تابع PSD و FAS با یکدیگر متفاوت‌اند. علت آن هم ماهیت متفاوت اما وابسته به فرکانس هر دوی توابع PSD و FAS است.

شکل (۱۶) پاسخ‌های دانسیته طیفی توان PSD ارتعاشات حاصل از ضربه برای ماسه ریزدانه در جعبه بزرگ فولادی پُر شده تا ارتفاع مدل لایه افقی خاک (۰/۴ متر) را نشان می‌دهد.



(الف)



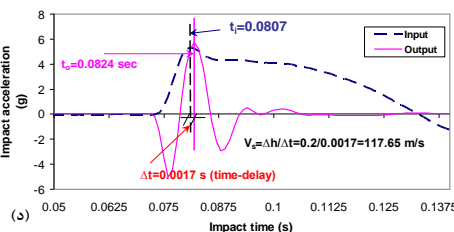
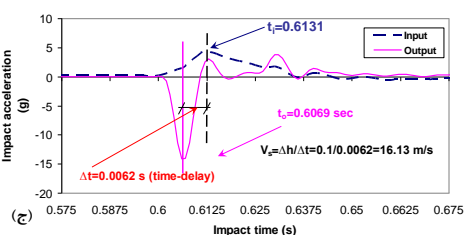
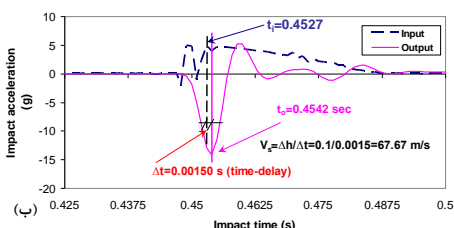
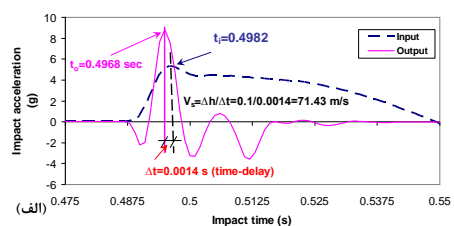
(ب)

شکل ۱۵- پاسخ‌های: الف) دانسیته طیفی توان، ب) طیف دامنه فوریه ارتعاشات حاصل از ضربه برای سه اندازه مختلف ذرات ماسه در جعبه کوچک

$$\bar{V}_s = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{0.10m \text{ or } 0.2m}{\text{time} - \text{delay}} \quad (۵)$$

$$\text{time} - \text{delay} = |t_o - t_i| \quad (۶)$$

که در رابطه فوق، n شماره مود نوسان طبیعی سیستم خاک تک‌لایه افقی همگن است، V_s سرعت موج برشی میانگین در لایه و H ضخامت کل لایه افقی خاک مستقر بر سنگ بستر (یا لایه سخت تحتانی در جعبه مدل‌سازی فیزیکی) است. مقدار t_o زمان نقطه اوج شتاب در حسگر بالایی (خروجی سطح لایه مدل) و t_i مقدار زمان در لحظه اوج پاسخ شتاب حسگر پایینی (ورودی) است. از طرفی Δh فاصله قائم مرکز به مرکز دو حسگر شتاب در دیواره قائم بدنه جعبه است، که در جعبه کوچک برابر ۰/۱ متر و در جعبه بزرگ‌تر معادل ۰/۲ متر است. نمودارهای مربوط به اندازه‌گیری متوسط سرعت موج برشی توسط روش دوم (روش تأخیر زمانی) در شکل (۱۸) برای سه اندازه مختلف ذرات ماسه ارائه شده است.



شکل ۱۸- محاسبه زمان تأخیر بین اوج‌های ورودی و خروجی در ماسه‌های: (الف) ریزدانه، (ب) متوسط، (ج) درشت دانه، (د) ماسه ریزدانه - جعبه بزرگ

دوم، فرکانس غالب مدل‌ها (نقاط اوج تابع انتقال)، با افزایش چگالی نسبی مقادیر بزرگ‌تری شده است. سوم، در خاک دانه‌ای سست، اثر ضربه بزرگ‌نمایی می‌شود (مقادیر TF بزرگ‌تر)، حال آن‌که در مدل لایه ماسه متراکم، اثر ضربه در حین انتشار موج رو به بالا در ستون خاک، تضعیف (دچار افت دامنه زیاد) می‌شود. این موضوع کاملاً با مطالب مراجع سازگار است (Kramer, ۱۹۹۶).

۵- صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت، صحت‌سنجی درستی و نیز میزان دقت یافته‌های مقاله حاضر، بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های سرعت موج برشی V_s انجام می‌شود. به همین منظور، سرعت موج برشی به دو روش به دست می‌آید و مقادیر آن‌ها با هم مقایسه می‌گردد: روش اول، استفاده از معادله (۱) از طریق جایگذاری فرکانس طبیعی مود اول ارتعاش حاصل شده از طیف‌های فرکانسی PSD (یا حتی FAS) بخش قبلی مقاله است. علاوه بر فرکانس طبیعی، مقدار مشخصه هندسی کلیدی لایه خاک شامل ارتفاع آن (پارامتر H) در مدل فیزیکی نیز در معادله (۱) جایگذاری می‌گردد. روش دوم، به طور کاملاً مستقل، سرعت موج برشی به صورت یک برآورد میانگین (و تا حدود اندکی تقریبی) از روش آزمایشگاهی (اندازه‌گیری) "تأخیر زمانی پالس ضربه" محاسبه می‌شود (Dezi و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳؛ Capatti و همکاران، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰). در این روش، پس از فیلترکردن میان‌گذر سیگنال‌های پاسخ شتاب ضربه پایین و بالای جعبه‌های مدل‌سازی فیزیکی، برای حذف اثرات نامطلوب فرکانس بالای موج اولیه یا فشاری P ، تأخیر زمانی^{۱۸} بین نقاط اوج^{۱۹} منحنی‌های پاسخ شتاب، جهت برآورد سرعت انتشار موج برشی S محاسبه شده است. با توجه به معادله (۴) با تقسیم فاصله ثابت قائم مابین حسگرهای شتاب بر مقدار تأخیر زمانی بین پاسخ‌هایشان، میانگین تقریبی سرعت موج برشی انتشار یافته V_s به دست می‌آید. در روش اول محاسبه سرعت موج برشی و سپس فرکانس طبیعی مدل‌های فیزیکی بر اساس روابط تحلیلی کلاسیک و شناخته شده صورت می‌گیرد. بر اساس محاسبات تحلیلی Kramer (۱۹۹۶) می‌توان فرکانس طبیعی مود n م ارتعاش آزاد (یعنی f_n) یک لایه همگن افقی را به شکل رابطه زیر نوشت:

$$f_n = \frac{(2n - 1)V_s}{4H} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (۲)$$

$$f_1 = \frac{V_s}{4H} \quad (۳)$$

$$V_s = f_1 \cdot 4H \quad (۴)$$

کاهش یابد مقدار سختی برشی مصالح مدل کاهش یافته G_m نیز کوچک تر از سختی برشی نمونه واقعی (ابعاد تمام مقیاس) G_p خواهد شد.

چنانچه با مقایسه در مقادیر سرعت موج برشی در جدول (۳) نیز مشاهده می گردد، با افزایش اندازه ذرات از ماسه ریز به متوسط تا درشت، به تدریج سرعت موج برشی هم کمتر می شود. علت آن وضعیت تراکمی ماسه (به ویژه ماسه درشت) در جعبه مدل سازی و نحوه قرارگیری و فضاهای خالی بین ذرات خاک در مجاورت حسگرهای شتاب است. به طوری که با افزایش اندازه ذرات خاک، در مدل های فیزیکی با ابعاد کاهش یافته، مقادیر چگالی نسبی و تراکم خاک کاهش یافته، که منجر به کاهش سختی برشی و سرعت موج برشی شده است.

جدول ۳- مقایسه نتایج سرعت موج برشی حاصل از اندازه گیری و رابطه فرکانس طبیعی

نوع مصالح	سرعت موج برشی V_s (m/s) بر اساس اندازه گیری و رابطه	
رابطه / روش محاسبه	معادله (۴) شکل (۱۵) و شکل (۱۶)	معادله (۵) شکل (۱۸)
ماسه ریز (جعبه کوچک)	۶۷/۱۸۴	۷۱/۴۳
ماسه متوسط	۶۴/۰۶۴	۶۶/۶۷
ماسه درشت	۱۴/۸۴۰	۱۶/۱۳
ماسه ریز (جعبه بزرگ)	۱۲۵/۰۰	۱۱۷/۶۵
متوسط مقادیر خطای اندازه گیری دو روش	۶/۳۳	۶/۳۲

۶- بحث و نتیجه گیری ها

در این تحقیق مدل های فیزیکی برای اندازه گیری پاسخ های ارتعاش آزاد جعبه صلب مدل سازی فیزیکی حاوی ماسه مورد بررسی قرار گرفته است. مدل های ماسه در سه حالت با تغییر اندازه میانگین ذرات ماسه و در دو مقیاس کوچک- مقیاس و میان- مقیاس اجرا شده اند. آزمایش های پالس ضربه و پاسخ های شتاب آن در دو نقطه از مدل های فیزیکی با نصب حسگرهای شتاب پیزوالکتریک، برای بررسی پاسخ های ارتعاش آزاد به کار گرفته شده است. نتایج مختلفی از این تحقیق قابل دستیابی و اثبات است، که در ادامه به تعدادی از مهم ترین آن ها اشاره می شود:

۱) در مدل سازی های فیزیکی کوچک- مقیاس و میان- مقیاس میزان قابل حصول تراکم خاک های دانه ای در جعبه های صلب، وابسته به اندازه ذرات خاک است و هر چه میانگین اندازه ذرات خاک بزرگ تر شوند، آستانه های چگالی نسبی قابل دستیابی

از طرفی با توجه به ارتفاع کم مدل فیزیکی لایه خاک و نیز همگن بودن و یکنواختی کامل آن در مدل های فیزیکی، تقریباً اختلاف ناچیزی بین سرعت موج برشی نقطه ای و مقادیر متوسط آن وجود دارد. مطابق شکل های (۱۸-الف) تا (۱۸-ج) با افزایش اندازه ذرات خاک ماسه ای، به دلیل افزایش تخلخل مدل خاک و کاهش چگالی نسبی، مقادیر تأخیر زمانی بین دو پالس زمانی شتاب ضربه در بالا و پایین مدل افزایش یافته است (از مقدار ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۱۵ و ۰/۰۰۶۲ ثانیه). یعنی حرکت موج انتشار یافته حاصل از ضربه آزمون در ارتفاع مدل فیزیکی با سرعتی به مراتب کمتر و کندتر انجام شده است.

در جدول (۳) مقایسه نتایج سرعت موج برشی حاصل از اندازه گیری (روش دوم) و رابطه فرکانس طبیعی / اندازه گیری (روش اول) ارائه شده است. در حقیقت انطباق جواب های دو روش، تأیید غیرمستقیم بر نتایج طیفی- فرکانسی تابع توان PSD ارائه شده در بخش قبلی مقاله است. بر این اساس، اختلاف بین نتایج دو روش مستقل به طور میانگین در حدود ۶/۴۰٪ است که مقدار ناچیزی است.

در این بخش، تلاش محاسباتی قابل توجهی در خصوص کنترل چندباره تمامی جزئیات اندازه گیری ها و محاسبات صورت گرفته است، تا مقادیر خطا در خلال اندازه گیری های دینامیکی- لرزه ای (ارتعاش آزاد) کمتر از ۷٪ شود. مقادیر مندرج در جدول (۳) سرعت موج برشی محاسبه شده در مدل به دو روش پیش گفته است که به راحتی با جایگذاری مقادیر فرکانس ها (از طیف PSD) شکل های قبلی (۱۵) و (۱۶) و تأخیرهای زمانی از شکل قبلی (۱۸) به راحتی قابل محاسبه و کنترل مجدد است.

علت اختلاف زیاد بین سرعت موج برشی مدل ماسه درشت نسبت به مدل های ماسه ریز و متوسط، به دلیل ضعیف بودن و دشواری فرآیند تراکم ماسه درشت (چگالی نسبی D_R حدود ۴۹٪) در جعبه های کوچک مدل سازی نسبت به ماسه ریز ($D_R=61\%$) و ماسه متوسط ($D_R=53\%$) است. از طرفی مطابق مطالب گفته شده قبلی و روابط مراجع معتبر (Al-Defae و همکاران، ۲۰۱۳)، هرچقدر تراکم و چگالی نسبی خاک دانه ای کمتر باشد، سختی آن هم کاهش می یابد. سختی برشی G مطابق رابطه $V_s=(G/\rho)^{0.5}$ به طور مستقیم مرتبط با سرعت موج برشی V_s و به طور معکوس وابسته به چگالی جرمی مصالح ρ است. از سوی دیگر با کاهش ابعاد مدل های فیزیکی آزمایشگاهی با توجه به نسبت مقیاس پارامتر سختی $G_m/G_p=n^{0.5}$ (Wood، ۲۰۰۴) به میزانی که نسبت مقیاس ابعاد هندسی مدل فیزیکی n (که در اینجا ۳۰ و ۱۰۰) است،

فرکانس تشدید مدل کاهش می‌یابد (برابر $18/6\text{Hz}$ برای ماسه درشت) و پیروید طبیعی آن افزایش پیدا می‌کند. یعنی برای اجرای مدل‌های فیزیکی خاک دانه‌ای درشت‌تر بایستی به‌عنوان یک راهکار حداقلی (ولیه) ابعاد جعبه مدل‌سازی بزرگ‌تر شود. علاوه بر این راه حل می‌توان با جوش دادن ورق‌های سخت با افزایش سختی جعبه، فرکانس تشدید مجموعه خاک و جعبه را بزرگ‌تر (با جابه‌جا) کرد.

۷) یک تابع سهموی بین تغییرات قطر متوسط ذرات خاک دانه ای بدانه‌بندی شده D_{50} و بزرگ‌نمایی شتاب‌های پاسخ مدل فیزیکی وجود دارد، که ناشی از صعود و نزول مشخص مقادیر شتاب به علت اثرات سختی-تخلخل-تراکمی سنگ‌دانه‌هاست. از طرفی، ضریب تعیین R^2 این تابع بیش از $0/96$ است، که نشان دهنده دقت بسیار بالای برازش داده‌های آزمایشگاهی است.

۸) آزمایش پالس ضربه چکش برای مدل فیزیکی در میدان شتاب $1g$ به‌خوبی می‌تواند رفتار پیش‌لرزه‌ای ارتعاش آزاد (یعنی انتشار امواج برشی) و فرکانس طبیعی خاک‌های دانه‌ای را با دقت بالایی محاسبه کند. دلیل این موضوع نیز متوسط اختلاف ناچیز حدود $6/33\%$ مابین نتایج سرعت موج برشی ارائه شده این نوع آزمایش در مقاله حاضر، در مقایسه با مقادیر حاصل از روابط پیشنهادی مراجع معتبر است. اثرات مجزای انتشار امواج فشاری و برشی ناشی از ضربه در نتایج این تحقیق با دقت بالایی محاسبه و مشاهده شده‌اند. حسگر شتاب نزدیک به ضربه نسبت به حسگر دورتر، کمتر تحت تأثیر تولید امواج فشاری قرار گرفته است. علت آن هم مسأله انتشار موج بوده است.

۶- مراجع

بایوردی ش، مجتهدی ع، "توسعه یک روش کارآمد عیب‌یابی سازه‌های در سکوه‌های فراساحلی شابلونی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری اجتماع ذرات"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵، ۴۶ (۴)، ۳۷-۴۹.

روشن‌روان آ، تارنژاد ر، دامادی پور م، محجوب ح، "شناسایی مودال سد بتنی قوسی با استفاده از روش ترکیبی تجزیه دامنه فرکانس و تبدیل موجک"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵، ۴۶ (۳)، ۱۷-۲۹.

Al-Defae AH, Caucis K, Knappett JA, "Aftershocks and the whole-life seismic performance of granular slopes", *Geotechnique*, 2013, 63 (14), 1230-1244. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.149>

Altunisik AC, Kalkan EFYFY, Ozgan K, Karahasan OS, Bostanci A, "Non-destructive modal parameter identification of historical timber bridges using ambient vibration tests after restoration", *Measurement*, 2019, 146, 411-424. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.06.051>

کوچک‌تر می‌شود. برای مثال، در این مطالعه، با حفظ ابعاد جعبه مدل‌سازی، مقادیر چگالی نسبی مدل ماسه ریز حدود 61% ، متوسط 53% ، درشت 49% و شن 20% حاصل شده است. راه حل اساسی استفاده از مدل‌های بزرگ-مقیاس یا تمام-مقیاس است که منجر به افزایش نجومی هزینه‌های مدل‌سازی فیزیکی و سربارهای (مرده) مدل فیزیکی به‌ویژه در گام اصلی بارگذاری لرزه‌ای می‌شود.

۲) سرعت انتشار امواج لرزه‌ای اولیه و ثانویه (فشاری و برشی) در مدل‌های فیزیکی جعبه صلب فقط وابسته به فرضیات سختی خاک دانه‌ای نیست و اندازه ذرات و محدودیت‌های جعبه مدل-سازی در مقادیر تخلخل (چگالی نسبی) قابل دستیابی و نحوه انتشار امواج، نقش تعیین کننده‌ای دارند. برای نمونه در این تحقیق، سرعت موج برشی جعبه کوچک حاوی ماسه ریز حدود 67m/s و سرعت موج برشی همان جعبه شامل مدل ماسه درشت در حدود 15m/s (حدود یک پنجم) اندازه‌گیری شده است.

۳) از اوج‌های تابع چگالی طیفی توان یک موج لرزه‌ای یا PSD می‌توان با دقت بسیار بالایی فرکانس‌های تشدید و سرعت موج برشی در مدل فیزیکی (کوچک-مقیاس) را برآورد کرد. چرا که اوج‌های این تابع از نظر فرکانسی، منطبق بر محل فرکانس اوج‌های پاسخ طیف فوریه موج ارتعاشی است. در اینجا، فرکانس غالب مدل برای ماسه ریز حدود 19Hz و در ماسه درشت 84Hz ($4/5$ برابر) به‌دست آمده است.

۴) در مدل‌های فیزیکی شامل خاک‌های درشت‌دانه بدانه‌بندی شده (همانند شن یا ماسه درشت فاقد ریزدانه یا پرکننده) نمی‌توان برای افزایش چگالی نسبی مدل فیزیکی تا حد خاک‌های ریزدانه، فرآیند تراکم و کوبیدن خاک درشت دانه را ادامه داد، چرا که منجر به خردشدگی ذرات درشت‌دانه و تغییر دانه‌بندی اولیه-طبیعی (پیش فرض) ذرات می‌شود. کمترین میزان چگالی نسبی مابین خاک-دانه‌های معادل 20% برای خاک شنی در این مطالعه مؤید این موضوع است.

۵) در خاک‌های دانه‌ای بدانه‌بندی شده، تغییرات قطر ذرات خاک ناچیز است و بیشتر ذرات در یک گروه هم‌اندازه هستند، لذا متراکم ساختن آن‌ها با افزایش اندازه قطر ذرات خاک، به‌طور طبیعی و ناخواسته در اثر افزایش حجم حفرات، دشوارتر می‌شود. به‌عنوان نمونه در ماسه ریز که قطر میانگین ذرات آن $0/75\text{mm}$ اندازه‌گیری شده است، نمودار دانه‌بندی دارای شیبی اندک (نزدیک به خط قائم) و بیشتر ذرات دیگر این نوع خاک، تقریباً مقدار اندکی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از این اندازه هستند.

۶) به‌عنوان یک محدودیت بسیار مهم، در مدل فیزیکی هر چه قدر از تراکم یک خاک دانه‌ای کاسته شود، که به‌طور طبیعی مطابق یافته‌های این مطالعه معادل افزایش اندازه ذرات خاک است (برای مثال خاک ماسه درشت با قطر ذرات D_{50} معادل 4mm ،

- with elastic supports”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146, 106978.
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106978>
- Hente C, Gebhardt CG, Pache D, Rolfes R, “On the modal analysis of nonlinear beam and shell structures with singular mass and stiffness matrices”, *Thin-Walled Structures*, 2019, 144, 106310.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106310>
- Hu T, Ding X, Shen L, Zhang H, “Improved adaptive growth method of stiffeners for three-dimensional box structures with respect to natural frequencies”, *Computers and Structures*, 2020, 239, 106330.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106330>
- Iai S, “Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1 g gravitational field”, *Soil Found*, 1989, 29 (1), 105-118.
<https://doi.org/10.3208/sandf1972.29.105>
- Kramer SL, “*Geotechnical earthquake engineering*”, 1996, New Jersey: Prentice-Hall. ISBN-10: 0133749436
- Lee JW, Lee JY, “Contribution rates of normal and shear strain energies to the natural frequencies of functionally graded shear deformation beams”, *Composites Part B*, 2018, 159, 86-104.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.050>
- Leng J, Peterman KD, Bian G, Buonopane SG, Schafer BW, “Modeling seismic response of a full-scale cold-formed steel-framed Building”, *Engineering Structures*, 2017, 153, 146-165.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.008>
- NI, National Instruments Corp., USA.
<http://www.ni.com/>.2022.
- Nicoletti R, “On the natural frequencies of simply supported beams curved in mode shapes”, *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 485, 115597.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115597>
- Niu Z, “Two-step structural damage detection method for shear frame structures using FRF and Neumann series expansion”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 149, 107185.
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107185>
- Noolvi B, Nagaraj S, “Modal analysis of smart composite cantilever beams”, *Materials Today: Proceedings*, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.643>
- Payan M, Khoshghalb A, Senetakis K, Khalili N, “Effect of particle shape and validity of G_{max} models for sand: A critical review and a new expression”, *Computers and Geotechnics*, 2016, 72, 28-41.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.003>
- Sinha A, “Computing natural frequencies and mode shapes of a non-uniform circular membrane”, *Mechanics Research Communications*, 2020, 107, 103553.
<https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2020.103553>
- Sharifi A, Sharifipour M, Rizvandy A, “Laboratory investigation into the effect of particle sizes on shear wave parameters using bender elements test results”, *Geotechnical Testing Journal*, 202, 43 (5), 1216-1232.
<https://doi.org/10.1520/GTJ20180240>
- American society for testing and materials, “Annual book of ASTM standards”, 1999, 4, 04.08, west Conshohoken Pa.
- Bartilson DT Jang J, Smyth AW, “Symmetry properties of natural frequency and mode shape sensitivities in symmetric structures”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 143, 106797.
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106797>
- Brøns M, Thomsen JJ, “Experimental testing of Timoshenko predictions of supercritical natural frequencies and mode shapes for free-free beams”, *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 459, 114856.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114856>
- Capatti MC, Dezi F, Carbonari S, Gara F, “Full-scale experimental assessment of the dynamic horizontal behavior of micropiles in alluvial silty soils”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113, 58-74.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.029>
- Capatti MC, Dezi F, Carbonari S, Gara F, “Dynamic performance of a full-scale micropile group: Relevance of nonlinear behaviour of the soil adjacent to micropiles”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128, 105858.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105858>
- Chellapandi P, Chetal SC, Raj B, “Numerical simulation of fluid-structure interaction dynamics under seismic loadings between main and safety vessels in a sodium fast reactor”, *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 253, 125-141.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.08.005>
- Cubrinovski M, Ishihara K, “Maximum and Minimum Void Ratio Characteristics of Sands”, *Soils and Foundations*, 2002, 42 (6), 65-78.
https://doi.org/10.3208/sandf.42.6_65
- Cubrinovski M, Ishihara K, “Empirical Correlation between SPT N-Value and Relative Density for Sandy Soils”, *Soils and Foundations*, 1999, 39 (5), 61-71.
https://doi.org/10.3208/sandf.39.5_61
- Dahak M, Touat N, Benseddiq N, “On the classification of normalized natural frequencies for damage detection in cantilever beam”, *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 402, 70-84.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.05.007>
- Dezi F, Gara F, Roi D, “Dynamic response of a near-shore pile to lateral impact load”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 40,34-47.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.04.002>
- Dezi F, Gara F, Roi D, “Experimental study of near-shore pile-to-pile interaction”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 48, 282-293.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.01.025>
- Ding H, Tan X, Dowell EH, “Natural frequencies of a super-critical transporting Timoshenko beam”, *European Journal of Mechanics/A Solids*, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2017.06.007>
- Elshamy M, Crosby WA, Elhadary M, “Crack detection of cantilever beam by natural frequency tracking using experimental and finite element analysis”, *Alexandria Engineering Journal*, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.10.002>
- Fei H, Danhui D, Zichen D, “A dynamic stiffness-based modal analysis method for a double-beam system

- Shifrin EI, Lebedev IM, "Identification of multiple cracks in a beam by natural frequencies", *European Journal of Mechanics/A Solids*, 2020, 84, 104076. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104076>
- Shravan HG, Rudesh RM, "Effect of Notch. Depth & Location on Modal Natural Frequency of Cantilever Beams", 2016. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.09.003>
- Sun W, Wang Z, Yan X, Zhu M, "Inverse identification of the frequency-dependent mechanical parameters of viscoelastic materials based on the measured FRFs", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 98, 816-833. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.05.031>
- Tomasiello S, "A Simplified Quadrature Element Method to compute the natural frequencies of multispans beams and frame structures", *Mechanics Research Communications*, 2011, 38, 300-304. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2011.04.002>
- Ueno K, "Methods for preparation of sand samples", *Proceedings of 1998 international conference of centrifuge*, 1998, 98, 1047-56.
- Wood DM, "Geotechnical modeling. [Version 2.2]", London: Taylor & Francis Group, 2004. <https://doi.org/10.1201/9781315273556>
- Zalka KA, "A simplified method for calculation of the natural frequencies of Wall-frame buildings", *Engineering Structures*, 2001, 23, 1544-1555. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00053-0)
- Zhang K, Yan Y, "Multi-cracks identification method for cantilever beam structure with variable cross-sections based on measured natural frequency changes", *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 387, 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.09.028>

EXTENDED ABSTRACT

Study of the Effects of Particle Size on the Pre-Seismic Behavior of Physical Models of Dry Granular Soils

Yazdan Shams Maleki *

Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kermanshah University of Technology (KUT), Kermanshah, Iran

Received: 22 April 2022; Review: 25 October 2022; Accepted: 12 October 2022

Keywords:

Granular embankment, Natural frequency, Physical model, Pre-seismic model, Particle size.

1. Introduction

To study the dynamics of embankment models, which is the basis for the construction of many engineering structures, physical modeling with different scales can be performed. The pre-seismic behavior of physical models has a great impact on the subsequent results of their seismic modeling. Appropriate experiments in this field can be used for pre-seismic examination of physical models. Free vibration and impact tests are among these tests (Dezi et al., 2012; Capatti et al., 2018; Kramer, 1996). Impact pulse tests (IPT) can be used to determine the natural frequency characteristics of physical models. Interpretation of frequency responses provides researchers with appropriate pre-seismic parameters. According to the evaluation of these findings in the first step, a suitable geometric scale can be selected for physical modeling. In addition, the relationship between soil conditions in terms of density and particle size and frequency response quantities of physical models is also determined. In this paper pre-seismic simulations of a small-scale physical model of a granular soil layer inside a rigid physical modeling box are developed.

2. Methodology

2.1. Experimental study

Physical modeling method has been used for laboratory (experimental) studies in this paper. Physical models of the granular soil layer are implemented inside the rigid box. The model embankment layer inside the modeling box includes the separate implementation of three different particle sizes of sandy soil, including fine-grained, medium-grained and coarse-grained sand, as well as a fine-grained gravel case. To investigate the pre-seismic behavior and natural frequency of physical models of granular embankment, acceleration sensors have been installed at the height of the modeling box and the vibration responses of the hammer impact pulse test have been extracted. Sandy and gravelly soils have been selected of the poor-grained type to investigate the side effects of void ratio and density of the models on the frequency responses. Short-term impact acceleration (less than 1 second) has been qualitatively and quantitatively analyzed in both time and frequency domain.

2.2. Physical modeling

Physical modeling of the granular embankment layer inside the rigid box has been performed in two small-scale dimensions of one-hundredth (Fig. 1) and one-thirtieth (Fig. 2) of the prototype. Granular soils with a relative density between 20% to 60% are embedded in the box as a layer of embankment using the sand raining (pluviation) method. The arrangement of the acceleration sensors in the body of the physical modeling box is

* Corresponding Author

E-mail addresses: y.shamsmaleki@kut.ac.ir (Yazdan Shams Maleki)

such that the time delay between the place of impact (input acceleration) and the impact response (output acceleration) can be measured (Figs. 1 and 2). Butterworth band-pass frequency filter with a frequency range between 0.1 and 100 Hz is applied to eliminate the effects of high frequency of the initial compressive waves (P-waves) generated by the impact on the impact acceleration responses of the extracted. Acceleration data are collected with good frequency resolution to analyze the state of shear stresses and the shear wave propagation velocity at the height of the physical model.

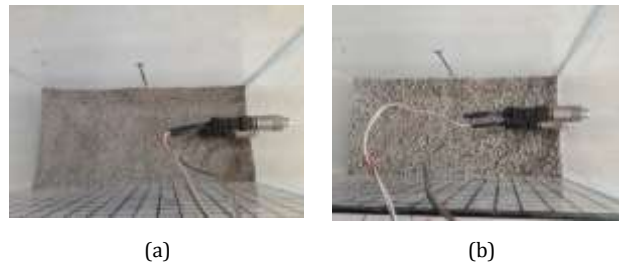


Fig. 1. Arrangement of acceleration sensors in a small box of physical modeling containing: (a) fine-grained sand, (b) medium-grained sand.

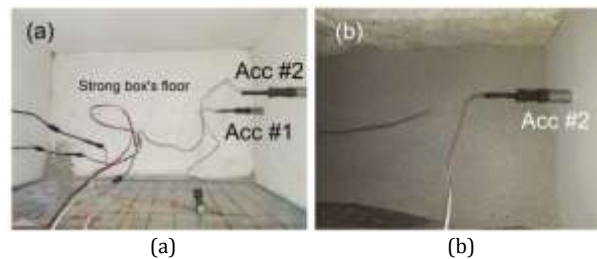


Fig. 2. Arrangement of acceleration sensors in a large physical modeling box: (a) Empty box, (b) Box with fine-grained sand model.

3. Results and discussion

3.1. Effect of granular soil particle size on the pre-seismic physical models

In physical models of poor-grained granular soils, changes in soil particle diameters are negligible and most particles are in the same group, so compacting them by increasing the size of the soil particle diameter, naturally and unintentionally due to the increase in pore volume, it gets harder. As a very important limitation, in the physical model, the lower the density of a granular soil, which is naturally equivalent to an increase in soil particle size according to the findings of this study, the lower the resonance frequency of the model (and the natural period is increased). That is, in order to implement physical models of coarse-grained granular soil, the dimensions of the modeling box should be enlarged as a minimum (initial) solution. The resonant frequencies and shear wave velocities in the physical (small-scale) model can be estimated with very high accuracy from the peaks of the power spectral density function (or PSD). As shown in Fig. 3, as the size of the sandy soil particles increases, the resonance frequency decreases. In physical models including coarse-grained soils (such as gravel or coarse sand without fine-grained particles or filler) it is not possible to continue the compaction process of coarse-grained soils to increase the relative density of the physical model to the threshold of the maximum density of the fine-grained soils. Because the use of more compaction energy leads to the crushing of coarse particles and changes in the initial-natural (default) particle size.

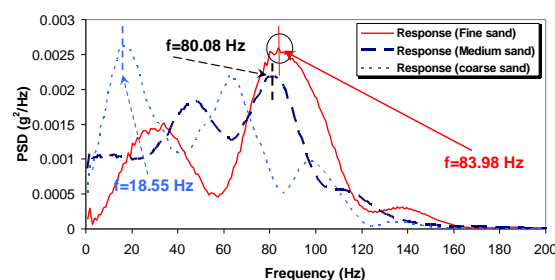


Fig. 3. Power spectral density responses of impact vibrations for three different sizes of sand particles in a small box

3.2. Parametric study findings

According to Fig. 4, a parabolic relationship (quadratic and nonlinear) between the changes in the mean diameter of soil particles D_{50} and the amplification of the acceleration amplitude at the height of the box (with appropriate accuracy) is observed. Accordingly, the empty box response naturally reveals the lowest magnification between the acceleration amplitudes of the input (lower sensor) and the output (upper sensor). Then, as the size of the sand particles increases, so does the magnification. Until the particle size becomes equivalent to gravel particles. In this case, due to the lower achievable relative density of gravel particles in physical modeling (relative increase in void ratio-inter particle voids) and the higher intrinsic stiffness of the gravel particles compared to sand, (in the fixed volume of the rigid box) again the response of the impact acceleration amplitude has been attenuated/reduced. In fact, here the higher stiffness of gravelly materials than sands has reduced the amplitude of the response acceleration. On the other hand, the higher void ratio of these materials (gravel) has reduced the magnification of the response acceleration amplitude compared to the similar coarse sand.

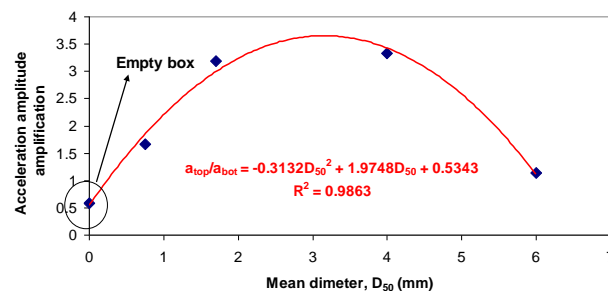


Fig. 4. Parabolic relationship between changes in average diameter of soil particles (D_{50}) and amplification of acceleration amplitude at box height

4. Conclusions

In this study, physical models of the soil layer inside the rigid box have been implemented. There are four sizes for granular soil particles. Sandy and gravelly granular soils were selected. Natural frequency and pre-seismic studies of the physical model have been performed to successfully create the next seismic physical model. Based on the findings of this study, there is a parabolic function between the changes in the mean diameter of granular soil particles, D_{50} , and the amplification of the response accelerations of the physical model, which is due to the clear ascend and descend of acceleration values due to the stiffness-void ratio-compaction effects of the soil aggregates. Also, hammer impact pulse testing for the physical model in the 1g acceleration field can well calculate the free-vibration seismic behavior and natural frequency of granular soils with high accuracy. The separate effects of propagation of compressive and shear waves due to impact have been calculated and observed with high accuracy in the results of this research. The near-impact acceleration sensor is less affected by the generation of compressive waves than the farther sensor. The reason was the issue of wave propagation.

5. References

- Capatti MC, Dezi F, Carbonari S, Gara F, "Full-scale experimental assessment of the dynamic horizontal behavior of micropiles in alluvial silty soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113, 58-74. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.029>
- Dezi F, Gara F, Roi D, "Dynamic response of a near-shore pile to lateral impact load", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 40,34-47. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.04.002>
- Kramer SL, "Geotechnical earthquake engineering", 1996, New Jersey: Prentice-Hall. ISBN-10:0133749436