

# انتخاب مقیاس بهینه مدل سازی فیزیکی شیب ماسه ای خشک توسط مطالعه آزمایشگاهی

یزدان شمس ملکی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر اختری<sup>۲</sup>

- ۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، ایران.
- ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران.

\*y.shamsmaleki@kut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴

## چکیده

در این تحقیق به کمک اجرای مدل های فیزیکی، تحلیل های ارتعاش آزاد و فرکانس طبیعی انجام شده است. مدلسازی های آزمایشگاهی در مهندسی ژئوتکنیک می تواند در میدان شتاب  $1g$  انجام شود. در مدلسازی ها، ارتباط بین فرکانس های مدل و نمونه واقعی از اهمیت کلیدی برخوردار است. در این تحقیق به کمک اجرای آزمایش های دینامیکی پالس ضربه چکش، محدوده های فرکانس های بهینه بر مبنای مقیاس هندسی برای مدلسازی فیزیکی شیب درون جعبه قوی بررسی و انتخاب می شوند. شیب های ماسه ای مدل با زوایای مختلف ۲۵ تا ۶۰ درجه ای درون جعبه مدلسازی ایجاد شده است. دانسیته نسبی مدل های شیب ماسه ای متوسط و در حدود ۵۰ تا ۵۲ درصد است. محدوده فرکانسی مورد بررسی با توجه به مطالعه پیش لرزه ای مدل های میز لرزان بین ۰/۰۰۱ تا ۱۵۰ هرتز انتخاب شده است. مطابق یافته های تحقیق حاضر، در یک مدل شیب ثابت فرکانس هایی که در آنها حداکثر انرژی لرزه ای نهفته است در مقایسه با فرکانس های با بیشترین دامنه پاسخ بزرگنمایی شده، کاملاً متفاوت هستند. نتایج مطالعه حاضر وجود رابطه ای بین زاویه شیب ماسه ای، فرکانس های مدل فیزیکی و فرکانس بزرگنمایی مدل را اثبات می کند. به طوری که با افزایش زاویه شیب های مدل در یک ارتفاع ثابت، مقادیر بزرگنمایی پاسخ شتاب ضربه کاهش می یابد.

**واژگان کلیدی:** آزمایش پالس ضربه چکش، فرکانس تشدید، فرکانس طبیعی، شیب ماسه ای، زاویه شیب.

## ۱- مقدمه

مدلسازی فیزیکی در دو میدان شتاب  $1g$  یا  $ng$  قابل انجام است. از معروف ترین مدل های میدان شتاب  $1g$  می توان مدل های آزمایشگاهی استاتیکی یا مدل های لرزه ای از نوع میز لرزان را نام برد. همچنین مدل های در میدان شتاب  $ng$  نیز به طور کلی

مدلسازی های حوزه مهندسی ژئوتکنیک به روش های گوناگونی انجام می شود. مدلسازی های فیزیکی یکی از کاربردی ترین زمینه ها در مدلسازی های آزمایشگاهی هستند. به طور کلی

فرکانس در مدل سازی های لرزه ای را با دقت بیشتری مشخص می سازد [6]. در حال حاضر آزمون های چکش ضربه، برای تعیین مشخصه های دینامیکی سازه های حساس مهندسی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [7]. ترکیب آزمایش چکش ضربه با مفهوم تابع پاسخ فرکانسی<sup>2</sup> FRF می تواند ابهامات زیادی در زمینه رفتار فرکانسی مصالح جامد را برطرف سازد [8-9]. تابع پاسخ فرکانسی FRF در واقع همان حل ریاضی معادله حرکت دینامیکی ارتعاش آزاد است، که دقیقاً مشابه تابع انتقال شتاب، تعریف می شود [8-9].

تحلیل های ارتعاش آزاد، در چارچوب تابع پاسخ فرکانسی FRF می تواند حقایق زیادی را در خصوص مدل سازی های فیزیکی اجسام جامد آشکار کند. به عنوان نمونه در مقاله مرجع [10] از آزمون های پالس ضربه (IPT) برای یافتن فرکانس های طبیعی جعبه مدلسازی فیزیکی کوچک-مقیاس شیب ماسه ای در میدان شتاب  $1g$  استفاده شده است. در چارچوب تحلیل های FRF و ایجاد تابع انتقال (TF) بین دو نقطه مشخص در مدل فیزیکی، می توان از روش آزمون ضربه بهره گرفت. به طور کلی از تفسیر آزمون های ارتعاش محیطی، می توان پارامترهای تحلیل مودال را بدست آورد [11]. این نوع از آزمون ها در گروه آزمایش های غیرمخرب قرار می گیرد [11]. از تحلیل های تابع پاسخ فرکانسی FRF و در قالب آزمایش ضربه چکش<sup>3</sup> (HIPT) می توان برای تعیین پاسخ فرکانس طبیعی جعبه های مدلسازی فیزیکی نیز استفاده کرد [10].

آگاهی از فرکانس های طبیعی ارتعاش آزاد جعبه مدلسازی فیزیکی، برای جلوگیری از وقوع پدیده ناخوشایند تشدید و وقوع گسیختگی های ناخواسته قبل از موعد، در حین اجرای شبیه سازی های فیزیکی کوچک-مقیاس، بسیار ضروری است. تا حد امکان فرکانس های طبیعی مدل فیزیکی و فرکانس غالب تحریکات ورودی لرزه ای، باید از هم دور باشند تا خطر رخداد پدیده تشدید به مقدار کمینه برسد. به طور کلی، دو نوع جعبه مدلسازی شامل جعبه های صلب و انعطاف پذیر، در مدلسازی های فیزیکی در میدان های شتاب  $1g$  و  $ng$  به کار برده می شود.

منحصر به مدل های سانتریفیوژ ژئوتکنیکی است. مدلسازی های سانتریفیوژ و میز لرزان ژئوتکنیکی می تواند در هر دو نوع کانتینر صلب (جعبه قوی) یا انعطاف پذیر (لامینار باکس یا جعبه تیر برشی) اجرا شوند.

هر یک از این دو نوع کانتینر، دارای مزایا و معایبی هستند [1]. به هر حال هدف از اجرای مدلسازی های فیزیکی، شبیه سازی دقیق پدیده های واقعی مهندسی ژئوتکنیک است. به ویژه در مدلسازی های لرزه ای، برای حصول دقت لازم باید پارامترهای شبیه سازی شده مدل ها در هر دو حوزه اساسی زمان و فرکانس مورد بررسی قرار بگیرند. یعنی باید شرایط تشابه ابعادی در دامنه های زمان و فرکانس، بین مدل کوچک-مقیاس و نمونه واقعی یا پروتوتایپ برقرار شود [1]. توجه به مقیاس مدل سازی که در گام اول نسبت هندسی بین ابعاد مدل و پروتوتایپ است، بسیار ضروری است. در دانش ژئوتکنیک لرزه ای، با توجه به سابقه تحقیقات قبلی ثابت شده که بین ابعاد هندسی مدل و فرکانس های تحریک مورد نیاز، رابطه ای معکوس برقرار است [1-2].

در حال حاضر، در برخی منابع، رابطه مرجع  $T=2.61H/V_{sd}$  (بر اساس روش تیر برشی) برای برآورد پریود و فرکانس طبیعی مود اول ارتعاش آزاد شیب های خاکی به ارتفاع  $H$  و سرعت موج برشی مصالح  $V_{sd}$  بکار گرفته شده است [3-5]. هر چند، به تازگی این رابطه برای اثر انعطاف پذیری دره محل شیب و نسبت  $L/H$  (نسبت طول به ارتفاع دره شیب) با ضرایب  $\alpha$  (معادل نسبت امپدانس<sup>1</sup> برای تاثیر دادن انعطاف پذیری دره شیب و در دره صلب برابر  $\alpha=0$ ) و  $\beta$  (ضریب تاثیر همزمان نسبت امپدانس-انعطاف پذیری و نسبت  $L/H$  دره شیب) به شکل رابطه  $T_1=\beta(2.61H/V_{sd})$  اصلاح شده است [5].

اما باز هم در مدل سازی های فیزیکی کوچک-مقیاس، این رابطه به خوبی قادر نیست که آثار سختی جعبه مدلسازی را در تخمین فرکانس طبیعی شیب های مدل به حساب آورد [5]. استفاده از طیف های توان پاسخ لرزه ای امواج، آثار واقعی

2. Frequency response function (FRF)

3. Hammer impact pulse test (HIPT)

1. Impedance ratio

یک نکته، در این مقاله رفتار فرکانس طبیعی مدل فیزیکی شیب ها با لحاظ آثار مرزهای مصنوعی پیرامون آن، یعنی کف و دیواره‌های فولادی جعبه قوی و نیز زوایای شیب‌ها، به روش تجربی ارزیابی شده است.

## ۲- روش شناسی اجرای تحقیق

در این مطالعه از مدل فیزیکی ایجادشده در یک جعبه قوی (صلب) استفاده شده است. هدف اساسی این تحقیق، انجام بررسی تجربی درباره فرکانس‌های ارتعاش طبیعی مدل فیزیکی کوچک-مقیاس شیب ماسه‌ای خشک ریزدانه تیزگوشه است. این بررسی‌ها در محدوده وسیعی از فرکانس‌ها، شامل فرکانس های ۰/۰۰۱ تا ۱۵۰ هرتز انجام شده است. هدف از این کار، برقراری شرایط تشابه فرکانسی بین مدل و نمونه اصلی در میدان شتاب  $1g$  بوده است [1-2]. جعبه قوی مدلسازی فیزیکی که از جنس ورق‌ها و پروفیل‌های فولاد نرمه (St-37) ساخته شده، شامل ابعاد مفید داخلی  $800 \times 600 \times 500$  mm است. برای رعایت نسبت ابعادی یک، بین ارتفاع و عرض مدل فیزیکی شیب، ضخامت  $10$  cm از عرض داخلی جعبه، توسط بلوک پلی استایرن پوشانده شده است [27].

همچنین از حسگرهای شتاب پیزوالکتریک، با حساسیت قابل توجه  $1000$  mv/g به منظور ابزاربندی مدل‌ها استفاده شده است. جسم مرتعش شونده داخل حسگرها از جنس المان سرامیک PZT با ساختار حسگری<sup>۶</sup> از نوع مود برشی<sup>۷</sup> است. تفکیک پذیری<sup>۸</sup> فرکانسی (آهنگ داده برداری) برابر  $0.01$  Hz و زمان برداشت داده معادل زمان کوتاه برخورد یک ضربه و ۱ ثانیه است.

جعبه‌های صلب که در ادبیات فنی با نام جعبه قوی<sup>۱</sup> نیز شناخته می‌شوند [12-14]، در مدلسازی‌های ng در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی هم کاربردهای فراوانی دارند [15-19]. علاوه بر جعبه قوی، از جعبه لامینار<sup>۲</sup> هم در مدلسازی فیزیکی استفاده می‌شود، که در مقایسه با جعبه قوی، ویژگی‌های خاص خود را دارد [20-25]. در حین شبیه‌سازی رفتار فرکانسی زلزله‌های واقعی توجه به موضوع فرکانس تحریک، بسیار حیاتی است [1-2]. یعنی باید رفتار فرکانسی واقعی زلزله‌های وقوع یافته، به طور کامل در قالب تحریک مدل فیزیکی بازسازی شود [1]. از طرفی، رفتار فرکانسی مولفه‌های افقی (L و T) یک زلزله با مولفه قائم آن (V) تفاوت‌های اساسی دارد [26]. تا به حال اثر زوایای شیب کوچک-مقیاس بر مقادیر فرکانس طبیعی آنها در قالب مطالعات آزمایشگاهی، کمتر بررسی شده است [1, 2, 10, 23, 25].

به هر حال در این تحقیق، فرکانس‌های طبیعی و پاسخ زمانی فرکانسی جعبه قوی مدلسازی فیزیکی شیب ماسه‌ای خشک، به کمک آزمون ضربه چکش ارزیابی شده است. برای انجام آزمایش‌های ضربه، مدل فیزیکی شیب ماسه‌ای خشک با زوایای مختلف از ۲۵ تا ۶۰ درجه، توسط حسگرهای شتاب ابزاربندی شده است.

افزون بر تعداد ۸ مدل فیزیکی شیب ماسه‌ای، دو مدل زمین مسطح و جعبه خالی نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

تابع شتاب ضربه (تحریک ورودی) در کف شیب و شتاب پاسخ در تاج شیب، توسط حسگرهای شتاب ثبت شده است. پس از استخراج پاسخ‌های زمانی، تحلیل‌های فرکانسی شامل استخراج تابع انتقال<sup>۳</sup> (TF)، نسبت طیف پاسخ فوری<sup>۴</sup> (RFRS)، تابع چگالی انرژی طیفی<sup>۵</sup> PSD از نتایج زمانی مشتق شده‌اند. به کمک تعیین تابع انتقال یا RFRS میزان کمی فرکانس‌های طبیعی مدل شیب و جعبه صلب، در مودهای ارتعاشی مختلف، استخراج شده است. به هر حال، به عنوان

1. Strong box
2. Laminar box
3. Transfer function (TF)
4. Ratio of Fourier response spectrum (RFRS)
5. Power spectral density function (PSD function)

شکل ۱. هندسه شیب و چیدمان سنسورهای شتاب برای انجام آزمون ضربه.

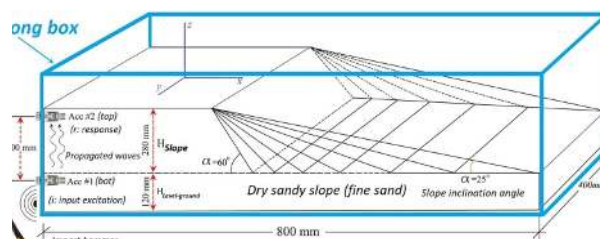


Fig. 1. Slope geometry and arrangement of acceleration sensors to perform impact test.

در ساخت شیب‌های ماسه‌ای، از روش بارش ماسه استفاده شده است. برای این منظور، از یک قیف فلزی بارشگر مطابق شکل (۲)، استفاده شده است. شکل (۲) نمایشی از جعبه قوی و ابزار بارش، برای ساخت شیب‌های مدل را ارائه می‌کند. مطابق شکل (۲)، قیف روی یک قاب راهنما سوار شده و ارتفاع ریل‌های افقی واقع بر کف قاب، توسط پایه‌های تلسکوپی، قابل تنظیم است.

شکل ۲. نمایش جعبه قوی و ابزار بارش ماسه برای ساخت شیب‌های مدل.

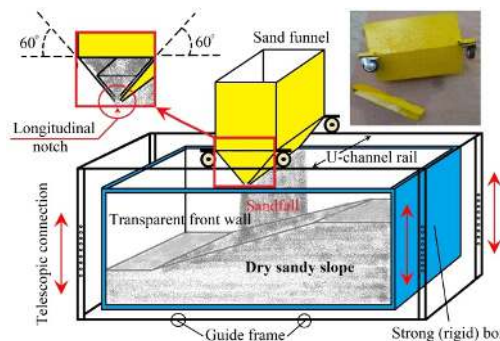


Fig. 2. Showing strong box and a tool for sand raining to build model slopes.

در خاک دانه‌ای، برای رسیدن به دانسیته نسبی مطلوب  $D_R$  یکنواخت در سراسر حجم مدل فیزیکی، دو عامل بسیار مهم است: (۱) ارتفاع سقوط ذرات و (۲) سرعت‌های خروج ذرات از بارشگر و سرعت‌های برخورد<sup>۲</sup> آنها [26]. منحنی‌های سرعت خروج،  $V_i$  و سرعت برخورد ذرات،  $V_t$ ، در شکل (۳) ترسیم شده،

همچنین محدوده مناسب برای ارتفاع سقوط ذرات در این شکل توسط نوار به رنگ آبی مشخص شده است. مطابق شکل (۳) ارتفاع سقوط آزاد ذرات ماسه برای کسب دانسیته نسبی  $0.52-0.50$ ، باید حداقل از  $0.3$  م بیشتر باشد (جایی که نمودار دو سرعت به یکدیگر میل می‌کنند).

شکل ۳. منحنی سرعت سقوط آزاد خروجی و برخورد ذرات ماسه ریزدانه کرمانشاه بر حسب ارتفاع سقوط ذرات آنها.

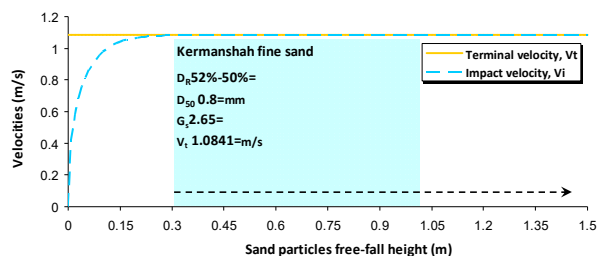


Fig. 3. Free-fall velocity curve of Kermanshah fine-grained sandy particles according to the height of their particle fall.

## ۲-۱- راستی آزمایی نتایج فرکانس طبیعی مود اول ارتعاش حاصل از اندازه‌گیری‌ها با روابط مراجع

در این بخش به منظور مقایسه و درستی آزمایی اولیه نتایج مطالعه حاضر، در جدول (۱) مقایسه مابین مقادیر فرکانس‌های طبیعی مود اول ارتعاش آزاد محاسبه شده توسط رابطه پیشنهادی مراجع معتبر [3-5] و اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی مقاله حاضر در میدان شتاب  $1g$  و در مقیاس ابعاد هندسی مدل، ارائه شده است. مطابق جدول، فرکانس مود اول ارتعاش اندازه‌گیری‌های این مطالعه برای شیب‌های مختلف مدل با مقادیر حاصل از رابطه مرجع  $f_i = V_i / 2.61H$  [3-5] حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد اختلاف دارد. علت این اختلاف، عدم تعریف زاویه شیب، دانسیته نسبی، سختی مصالح، شرایط مرزی مصنوعی مدل، تنش‌های محصورکننده پایین و ... در مدل تحلیلی مراجع است [3-5]. از طرفی نبود شیب (زمین مسطح) اختلاف بین مقدار محاسباتی مراجع [1-2] و اندازه‌گیری مطالعه حاضر را بسیار کم و در حدود ۷٪ کرده است.

1. Terminal velocity
2. Impact velocity

شکل ۴. مقایسه فرکانس‌های غالب برای تعداد ۱۲۰ رکورد زلزله شامل مولفه‌های طولی و عرضی.

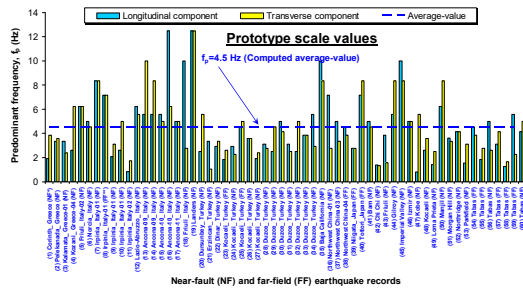


Fig. 4. Comparison of predominant frequencies for 120 earthquake records including L and T components.

در شکل (۵) نمودار مقیاس فرکانس مدل لازم برای مدلسازی با جعبه قوی در میدان شتاب  $1g$  برای شبیه‌سازی فرکانس مولفه طولی L و عرضی T زلزله‌ها رسم شده است. مطابق این شکل، با افزایش مقیاس مدلسازی، به طور طبیعی مقدار فرکانس لازم مدل، افزایش می‌یابد. مقدار میانگین فرکانس غالب پروتوتایپ محاسبه شده در این شکل برای رکوردهای زلزله برابر  $f_p=4.5$  Hz بدست آمده، که از میانگین فرکانس غالب در ۱۲۰ رکورد زلزله بررسی شده شکل (۴) حاصل شده است [27].

رابطه بین نسبت مقیاس هندسی مدلسازی  $n$  و فرکانس مدل موردنیاز  $f_m$  برای مدل‌های میدان شتاب  $1g$  رابطه‌ای توانی و به شکل  $n^{0.75}$  (برای ماسه) است [1]. در حالت کلی، هر چه قدر نسبت مقیاس مدل سازی (در مدل‌های  $1g$ ) افزایش پیدا کند (ابعاد مدل کوچک‌تر)، فرکانس تحریک مدل نیز به همان نسبت باید افزایش یابد، تا معیار تشابه فرکانس بین مدل و پروتوتایپ ارضاء شود [1-2]. از این رو تا مقیاس یکصدم (۱:۱۰۰) در مدل‌های میز لرزان، حداکثر میزان فرکانس موردنیاز مدل حدود  $150$  Hz است.

جدول ۱. مقایسه بین مقادیر فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده توسط روابط مرجع [1-5] و اندازه‌گیری‌های مقاله حاضر.

Compared cases and omputational relation	The first natural frequency $f_{n1}$ (Hz)	Conditions and % of laboratory and computational differences
Gazetas and Dakoulas (1992) [3], Ambraseys and Sarma (1967) [4], Yaseri and Konrad (2020) [5]: $f_1=V_s/(2.61H)$	26.62	Rectangular rigid canyon and impedance ratio of $\alpha=0$
The 30° slope (present study)	32.23	21.07%
The 60° slope (present study)	34.18	28.40%
Level-ground model ( $f_1=V_s/(4.0H)$ ) [1,2]	17.31	7.22%
Level-ground model (present study)	18.56	7.22%

Table 1. Comparison between the values of the natural frequencies calculated by the reference relationships [1-5] and the measurements of the present paper.

### ۳- تعیین فرکانس غالب برای رکوردهای زلزله واقعی

در شروع این مطالعه، روند انجام مطالعات مستقل از مقیاس (فقط وابسته به هندسه، شرایط مصالح، زمان و فرکانس مدل‌هاست) و در پایان آن، مقیاس‌های بهینه مدلسازی با توجه به حدود فرکانس لازم در میدان شتاب  $1g$  پیشنهاد شده است. مجهول اصلی تحقیق حاضر تعیین مقیاس بهینه بر اساس فاکتورهای مهم هندسه مدل‌های شیب (زاویه شیب)، چگالی ماسه، اثر مرزهای صلب جعبه قوی و فرکانس تحریک است.

در شکل (۴) نمودار تعیین فرکانس غالب برای مولفه‌های افقی (طولی و عرضی) ۱۲۰ رکورد زلزله مختلف همزمان ترسیم شده است. مطابق آن، میانگین فرکانس غالب برای مولفه‌های افقی ۱۲۰ رکورد شتاب زلزله (شامل مولفه‌های افقی طولی L و عرضی T) برابر  $f_p=4.5$  Hz بدست آمده است (شکل ۴).

مقیاس اصلی (حدود ۲۰ متر سربار ماسه خشک) بدست آمده است (جدول ۳). همچنین، مقدار سختی برشی دینامیکی بیشینه ماسه در ابعاد مدل (سربار با ارتفاع ۰/۴ m)، از رابطه مرجع زیر بدست می آید [29]:

$$G_{dmax} = K_p P_a (\sigma_m / P_a)^n \quad (1)$$

$$K_p = 295.62 \rho_d^2 + 197.09 \rho_d - 386.6 \quad (2)$$

$$n = -0.6094 \rho_d^2 + 1.8892 \rho_d - 0.9698 \quad (3)$$

که در این روابط  $\rho_d$  چگالی خشک مصالح ماسه ای ( $\text{gr/cm}^3$ ) تنش حجمی میانگین در مصالح ماسه (Pa) و  $P_a$  فشار استاندارد جو برابر 101kPa است [29].

شکل ۶. نتایج آزمایش های (آ) برش مستقیم و (ب) سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده CD روی ماسه مورد استفاده تحقیق.

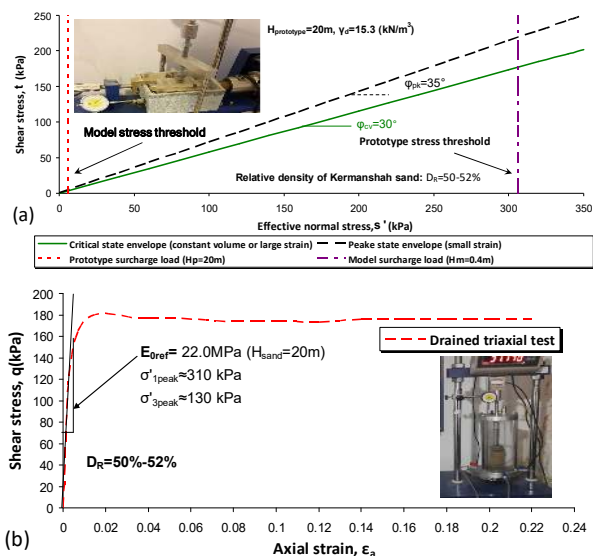


Fig. 6. Results of tests: (a) direct shear and (b) consolidated-drained triaxial CD on the sand used in the research.

جدول ۳. مشخصات مقاومتی و سختی ماسه مورد استفاده تحقیق.

Characteristics of used sand Symbol (unit)	Value
Poisson ratio, $\nu$ (-)	0.30
Cohesion, $C$ (kPa)	0.00
Internal friction angle (peak), $\phi_p$ (deg)	35.00
Dilation angle, $\psi$ (deg)	5.00
Dry unit weight, $\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	15.30
Elastic modulus, $E$ (MPa)	22.00
Static shear modulus, $G_{st}$ (MPa)	8.50
Dynamic shear modulus, $G_{dmax}$ (MPa)	10.50
Sand relative density, $D_R$ (%)	50-52

Table 3. Strength and stiffness characteristics of the sand used in the research.

شکل ۵. فرکانس های مدل لازم برای مدلسازی با جعبه قوی در میدان شتاب 1g برای شبیه سازی آثار فرکانسی واقعی.

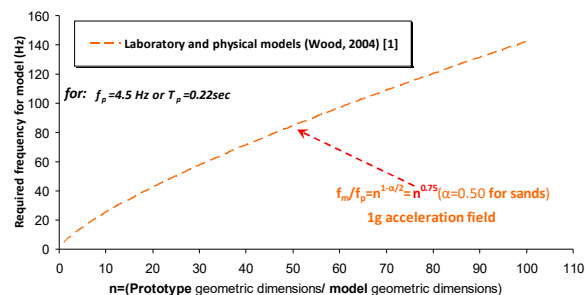


Fig. 5. Required model frequencies for strong box modeling in the 1g acceleration field to simulate the real frequency effects.

#### ۴- مشخصات ماسه و جزئیات مدل های فیزیکی

در اینجا، مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده در ساخت مدل های فیزیکی ارائه می شود. برای ساخت مدل ها، از ماسه سربار کرمانشاه استفاده شده است. این ماسه از نظر جنس، خاستگاه آهکی دارد و حاصل معادن سنگ شکنی است. پس، از نظر شکل ظاهری، جز ماسه های شکسته و تیز گوشه است. دانه بندی و توزیع ذرات ماسه طوری انتخاب شده که طبق معیار طبقه بندی خاک USCS [28] ماسه بدانه بندی شده SP باشد. جدول (۲) مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده در مدلسازی های فیزیکی مطالعه حاضر را ارائه می کند. جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه خشک مورد استفاده.

Physical characteristics (Symbol)	Value (unit)
USCS category	SP
Maximum dry density ( $\gamma_{dmax}$ )	2.16 ( $\text{gr/cm}^3$ )
Minimum dry density ( $\gamma_{dmin}$ )	1.20 ( $\text{gr/cm}^3$ )
Maximum void ration ( $e_{max}$ )	1.25
Minimum void ratio ( $e_{min}$ )	0.25
Specific gravity ( $G_s$ )	2.65
Effective diameters ( $D_{10}$ )	0.38mm
Mean diameter ( $D_{50}$ )	0.80mm
Coefficient of uniformity ( $C_u$ )	2.37
Coefficient of curvature ( $C_c$ )	1.05

Table 2. Physical characteristics of the dry sand used.

مطابق شکل (۶) مشخصات سختی و مقاومتی خاک ماسه ای استفاده شده، از تجمیع نتایج آزمایش های مقاومت برشی استاندارد [28] برش مستقیم و سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده CD در

چکش، یک تحریک تک دامنه و به طور غالب در دامنه مثبت شتاب افقی است. در شکل (۹-ب) پاسخ‌های شتاب ضربه دو-دامنه در تاج شیب‌ها، با زوایای شیب مختلف و نیز برای مدل زمین مسطح و جعبه خالی ارائه شده است.

شکل ۹. (آ) پالس‌های تحریک تک-دامنه ورودی؛ (ب) پاسخ‌های شتاب ضربه دو-دامنه در بالای تاج شیب‌های ماسه‌ای خشک.

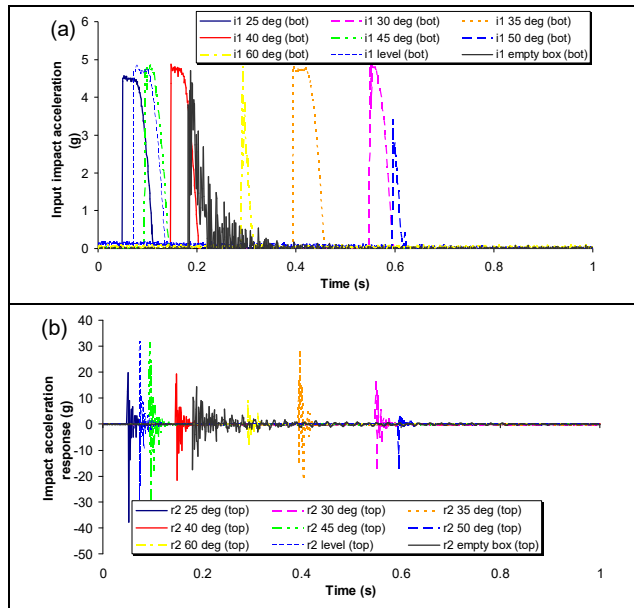


Fig. 9. (a) Single-amplitude input excitation pulses; (b) Double-amplitude impact acceleration responses at the top of dry sand slope crest.

بر حسب مقایسه شکل‌های (۹-آ) و (۹-ب)، لایه شیب پاسخ شتاب ضربه را در هر دو دامنه مثبت و منفی، دچار بزرگنمایی می‌کند. به طوری که شتاب ورودی در حد 5g حدود ۱۰ برابر یعنی تا 50g بزرگنمایی شده است. شکل (۱۰) چگونگی استقرار حسگرهای شتاب و اتصال الکترونیکی سیگنال کاندیشنرها و کارت داده برداری پرتابل و چگونگی اتصال USB آن به رایانه را نشان می‌دهد. برای هر حسگر شتاب از یک سیگنال کاندیشنر DC ۲۴ ولت استفاده شده تا تغییرات ولتاژ خام خروجی از حسگرها را ایزوله و بزرگنمایی کند. کارت داده‌برداری<sup>۱</sup> با درگاه‌های ورودی دیجیتال و آنالوگ

شکل (۷) منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده، یعنی ماسه سراب کرمانشاه را ارائه می‌کند. مطابق شکل (۷) بخش عمده آن از نوع ماسه ریزدانه (ذرات زیر ۱mm) است.

شکل ۷. منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده: ماسه سراب کرمانشاه.

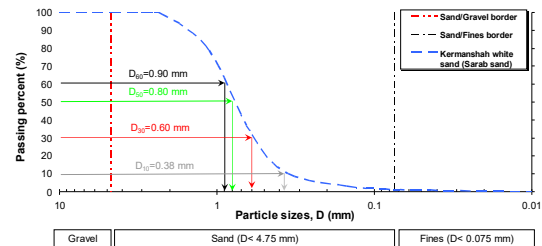


Fig. 7. Used sand particle size distribution curve: Kermanshah Sarab sand.

در شکل (۸) نمونه‌هایی از مدل‌های فیزیکی شیب ماسه‌ای، در حالات زاویه‌های شیب مختلف ۲۵ درجه در نما و پلان، ۳۵ درجه و ۴۰ درجه نمایش داده شده است. در هنگام انجام این مطالعه، پس از هر آزمایش در هر مدل شیب، فقط با تغییر زاویه شیب با حفظ ارتفاع ثابت دوباره سازی شده است.

شکل ۸. نمونه مدل‌های فیزیکی شیب ماسه‌ای در زاویه‌های شیب مختلف: (آ و ب) ۲۵ درجه در نما و پلان، (ث) ۳۵ درجه، (د) ۴۰ درجه.

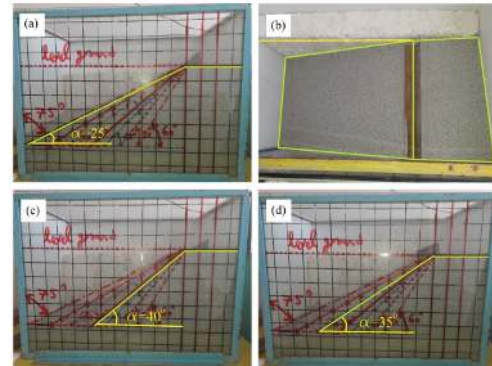


Fig. 8. Examples of physical models of sandy slopes at different slope angles: (a, b) 25° in facade and plan, (c) 35°, (d) 40°.

نمونه تحریک بکاررفته و پاسخ آن در تاج شیب برای آزمون‌های اجرا شده در شکل (۹) ترسیم شده است. در شکل (۹-آ) پالس‌های تحریک تک-دامنه ورودی برای شیب‌های مختلف، زمین مسطح (شیب صفر درجه) و نیز جعبه قوی خالی، همزمان رسم شده است. مطابق شکل (۹-آ) ضربه

افزون بر آن، در شکل (۱۲-آ) طیف پاسخ دامنه فوریه و در شکل (۱۲-ب) تابع انتقال شتاب‌ها بین ورودی و پاسخ پالس ضربه برای شیب ۶۰ درجه ارائه شده است. بر اساس شکل (۱۲-آ) بازهم روند کاهش دامنه طیف فوریه در شیب‌های بزرگ تر از ۴۵ درجه مشاهده می‌شود. در شکل (۱۲-ب) در بازه فرکانسی تا ۱۵۰ هرتز ۳ اوج مشخص در تابع بزرگنمایی شتاب پاسخ تاج وجود دارد، که هر یک از آنها اختلاف فرکانسی در حدود ۵۰ هرتز دارند. یعنی در هر ۵۰ هرتز افزایش فرکانس، یک فرکانس طبیعی ارتعاش آزاد مدل شیب ۶۰ درجه آشکار شده است.

شکل ۱۲. شیب ۶۰ درجه: (آ) طیف پاسخ فوریه، (ب) تابع انتقال شتاب‌ها.

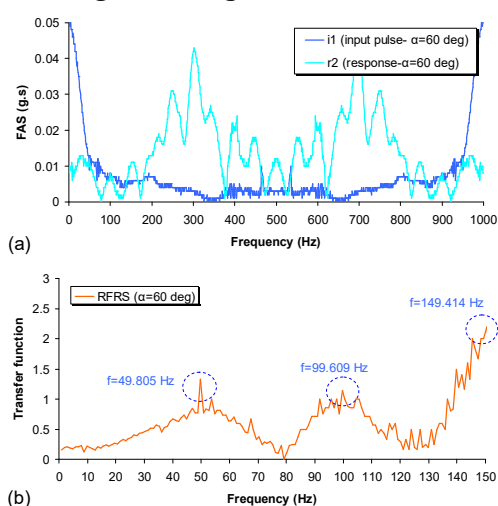


Fig. 12. 60° slope: (a) Fourier amplitude response spectrum, (b) accelerations transfer function.

بر اساس مقایسه نتایج شکل (۱۲) با شکل قبلی، بازهم روند کاهش مقادیر تابع انتقال (بزرگنمایی پاسخ شتاب ضربه) با افزایش زاویه شیب، در تمام محدوده فرکانسی مشاهده می‌شود. در شکل (۱۳) برای مورد مرجع مدل زمین-سطح، مقایسه بین شکل (۱۳-آ) شامل طیف پاسخ فوریه در دو نقطه کف و سطح مدل و شکل (۱۳-ب) تابع انتقال شتاب‌ها، داده شده است. با مقایسه دو شکل (۱۳-آ و ۱۴-آ) مشخص می‌شود که در جعبه خالی به علت سختی بالای جعبه به تنهایی، شکل طیف پاسخ در نقطه بالایی کاملاً دارای روند نوسانی و همراه با قله‌های بسیار است، که ناشی از سختی زیاد بدنه فولادی جعبه

(۷ کاناله) با تفکیک پذیری آنالوگ به دیجیتال 14 bit A/D از نوع ارتقاء یافته NI-USB 6009 انتخاب شده است [30].

شکل ۱۰. (آ) استقرار حسگرهای شتاب و اتصال الکترونیکی سیگنال کاندیشنرها؛ (ب) کارت داده برداری پرتابل و اتصال کل مجموعه به رایانه.

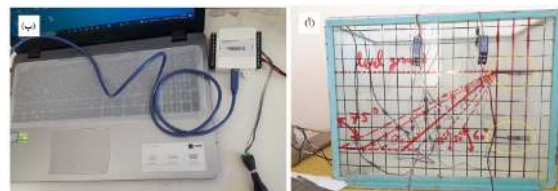


Fig. 10. (a) Deployment of acceleration sensors and electronic connection of signal conditioners; (b) Portable data card and connection of the whole set to the computer.

## ۵- ارائه ی نتایج مدل سازی های فیزیکی تحقیق

### ۱-۵- بررسی خروجی آزمون های پالس ضربه (IPTs)

در ادامه، پاسخ های طیفی نقاط تاج و کف شیب های مدل، به ازای تغییر در زاویه شیب ها ارائه شده است. پاسخ ها، برای بازه های فرکانسی طوری در نظر گرفته شده اند که مقدار فرکانس های مقیاس مدل، در مدل های 1g را به طور کامل پوشش می دهند.

در شکل (۱۱) طیف دامنه فوریه و تابع انتقال در شیب ۳۰ درجه ارائه شده است. همان گونه که از مقایسه این شکل با شکل بعدی (شکل ۱۲) برمی آید، مقادیر بزرگنمایی های پاسخ شتاب ضربه در محور قائم تابع انتقال، با افزایش زاویه شیب (تا ۳۰ درجه) کاهش مشخصی پیدا کرده، که بیش از ۵۰٪ است.

شکل ۱۱. شیب ۳۰ درجه ای: (آ) طیف پاسخ فوریه، (ب) تابع انتقال شتاب ها.

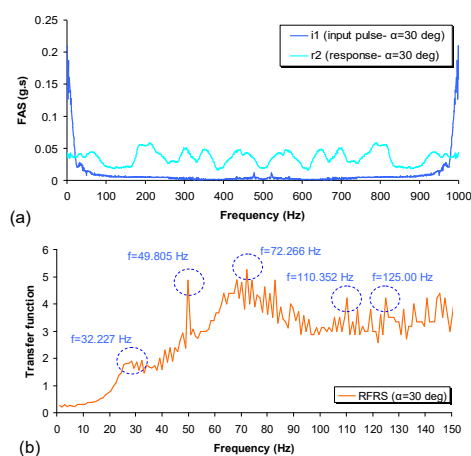


Fig. 11. The 30° slope: (a) Fourier amplitude response spectrum, (b) accelerations transfer function.



برای ایجاد بزرگنمایی در پاسخ شتاب نسبت به مدل‌های شیب دار وجود دارد.

شکل ۱۴. مدل جعبه قوی خالی: (آ) طیف پاسخ دامنه فوریه، (ب) تابع انتقال شتاب‌ها.

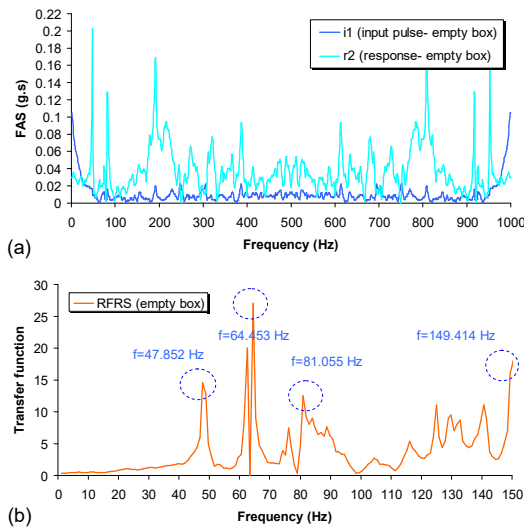


Fig. 14. Empty strong box model: (a) Fourier amplitude response spectrum, (b) acceleration transfer function.

حساسیت به فرکانس تابع دانسیته طیفی توان<sup>۱</sup> (PSD) و نسبت این توابع، در بین امواج ارتعاش آزاد بکار برده شده برای دو شیب ۲۵ و ۳۰ درجه‌ای، در شکل (۱۵) با پاسخ‌های بزرگنمایی شتاب مقایسه شده است. تابع دانسیته ی طیفی توان چگونگی توزیع انرژی ارتعاشی یک موج نسبت به فرکانس‌های مختلف آن را نمایش می‌دهد. برای نمونه، در دو فرکانس دلخواه  $f_1$  و  $f_2$  از یک سیگنال مشخص، انرژی نهفته در این دو فرکانس، نسبت به هم چگونه است. همان‌گونه که دیده می‌شود، در شکل (۱۵) اختلاف فاز فرکانسی در حدود ۱۲۸ Hz بین توابع PSD محاسبه شده در تاج شیب‌ها، برای ۵ درجه تفاوت در زاویه شیب‌های مدل، قابل مشاهده است. پس ۵ درجه اختلاف زاویه شیب‌ها، باعث ۱۲۸ Hz جابه‌جایی<sup>۲</sup> در مقادیر فرکانسی مرتبط با بیشترین انرژی نهفته در پاسخ ارتعاش آزاد نقطه تاج شیب (top) شده است. نتیجه آنکه در مدل‌سازی‌های فیزیکی، علاوه بر موضوع فراگیر کنترل دامنه‌های بزرگنمایی شتاب‌ها

1. Power spectral density function (PSD)
2. Shift of frequency

و تماس-اتصال بدون واسطه آن با روکش فلزی-آلیاژی حسگر شتاب است. در مورد شکل (۱۴-آ) حتی پاسخ فرکانسی تحریک ورودی هم در بیشتر فرکانس‌ها، مقادیر دامنه فوریه بالاتری را نشان می‌دهد.

شکل ۱۳. مدل زمین مسطح: (آ) طیف پاسخ دامنه فوریه، (ب) تابع انتقال شتاب.

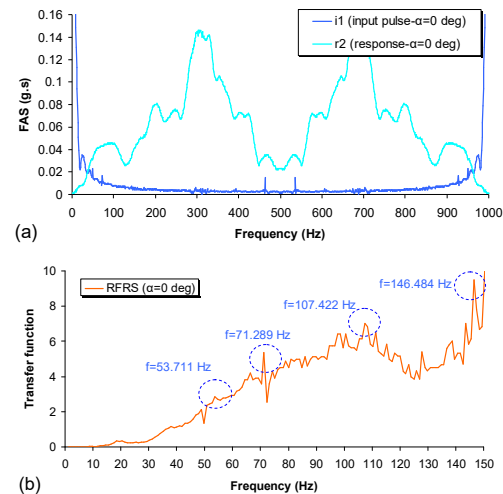


Fig. 13. Level-ground model: (a) Fourier amplitude response spectrum, (b) acceleration transfer function.

در حقیقت، جعبه خالی، به جای نمایش تعداد ۲ اوج فرکانسی مشخص و متمایز، چند نقطه اوج فرکانسی مجاور هم را نمایش می‌دهد. خالی یا پر بودن جعبه مدل‌سازی فیزیکی در ایجاد مقادیر اختلاف فرکانسی بین فرکانس‌های اوج در کل بازه فرکانسی نقش زیادی دارد. تاثیر پر یا خالی بودن جعبه بر دامنه‌های بزرگنمایی شتاب در ارتفاع جعبه، در شکل‌های (۱۳-ب و ۱۴-ب) برای محدوده فرکانسی متناظر با فرکانس مدل‌های 1g کاملاً روشن و مشخص است. بر اساس مقایسه شکل (۱۳-ب) با شکل (۱۴-ب) جعبه خالی دارای اوج‌های فرکانسی متعدد با بازه‌های فرکانسی مابین به مراتب کوچک تری است. مطابق مقایسه شکل‌های (۱۳-ب و ۱۴-ب) پر بودن جعبه باعث کاهش بزرگنمایی شتاب ضربه نسبت به جعبه خالی و نیز افزایش بزرگنمایی شتاب نسبت به مدل‌های شیب دار شده است. در واقع در مدل زمین مسطح، ماسه بیشتری

ضربه و انرژی (توان) امواج ضربه‌ای، برای مدل‌های 1g مشخص شده است.

شکل ۱۶. ارائه محدوده‌های فرکانسی بهینه و غیر بهینه برای مدل‌سازی‌های فیزیکی در میدان شتاب 1g برای شبیه‌سازی مولفه‌های افقی رکوردهای زلزله.

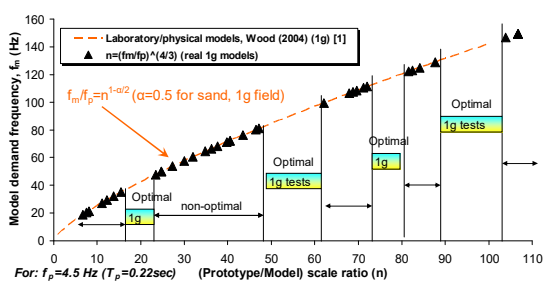


Fig. 16. Presentation of optimal and non-optimal frequency ranges for physical modeling in the 1g acceleration field to simulate the horizontal components of earthquake records.

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری‌ها

در این مطالعه، نتایج آزمایشگاهی ارتعاش آزاد رفتار فرکانسی شیب‌های ماسه‌ای خشک ساخته شده در جعبه قوی ارائه شده است. برای انجام آزمون‌های ارتعاش آزاد و اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی مدل‌های فیزیکی شیب و جعبه قوی، از روش پالس ضربه (IPT) استفاده شده است. حسگرهای شتاب در دو نقطه معین کف و تاج شیب‌های مدل نصب شده و پاسخ‌های آنها در حوزه‌های زمان و فرکانس، تحلیل شده است. ویژگی این مطالعه، اندازه‌گیری پاسخ‌های فرکانسی مدل‌های شیب با توجه به سختی دیواره‌ها و کف جعبه قوی، به عنوان مرزهای مصنوعی و ناخواسته تحمیل شده به مدل‌هاست. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تحقیق، به شرح موارد ذیل قابل بیان است:

- بر اساس دستاوردهای این مطالعه، با افزایش زاویه شیب مدل در حین ثابت ماندن ارتفاع آن، مقادیر بزرگنمایی‌های پاسخ شتاب ضربه کمتر می‌شود.
- فرکانس‌های بهینه در مدل‌سازی جعبه قوی در میدان شتاب 1g فرکانس‌هایی هستند، که در بزرگنمایی‌های شتاب، قبل از اعمال تحریک لرزه‌ای (حالت پیش لرزه ای) یا در حین آن، دخالتی نداشته باشند. بزرگ

نسبت به تغییرات فرکانس‌ها، رجوع به تغییرات توان و انرژی نهفته در هر فرکانس با توجه به امواج ورودی و پاسخ، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

شکل ۱۵. اختلاف فاز فرکانسی ۱۲۸ هرتزی بین توابع PSD در تاج شیب برای ۵ درجه اختلاف در زاویه شیب مدل ۲۵ و ۳۰ درجه ای.

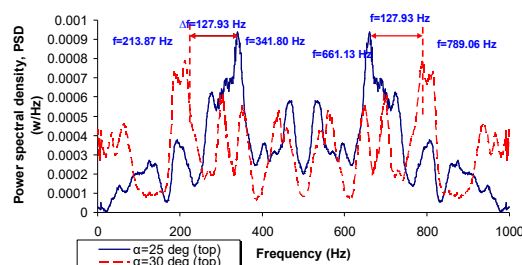


Fig. 15. 128Hz frequency phase difference between PSD functions in slope crest for 5° difference in 25° and 30° model slopes.

## ۵-۲- ارائه نتایج نهایی در زمینه انتخاب مقیاس‌های بهینه مدل‌سازی‌های فیزیکی در جعبه قوی

نتیجه اساسی و کلیدی مطالعه حاضر، در شکل (۱۶) با بازگشت به مفاهیم قوانین مقیاس فرکانس مطرح شده [1-2] در نمودارهای شکل (۵) در بخش قبلی، انعکاس یافته است. در شکل (۱۶) فرکانس  $f_m$  غالب مورد نیاز مدل و  $f_p$  فرکانس غالب نمونه واقعی است. سرانجام شکل (۱۶) نمودار محدوده‌های فرکانس و نیز نسبت مقیاس هندسی بهینه، برای مدل‌سازی فیزیکی در میدان شتاب 1g برای شبیه‌سازی میانگین فرکانس غالب مولفه‌های افقی طولی و عرضی (شکل ۱۶) رکوردهای زلزله واقعی مختلف پیش گفته را نشان می‌دهد. نتایج این نمودار، فقط برای شرایط جعبه‌های قوی صادق است و برای جعبه‌های لامینار هم اندازه، نتایج به دست آمده تقریبی و برای دقیق‌تر شدن، باید مطالعات آزمایشگاهی ارتعاش آزاد مشابهی روی آنها نیز انجام شود. در شکل (۱۶) نشان‌های مثالی سیاه-رنگ توپر فرکانس‌های (یا مقیاس‌های هندسی بین مدل و پروتوتایپ) بزرگنمایی شده (یعنی غیر بهینه) در هنگام مدل‌سازی با جعبه قوی تحقیق حاضر را نمایش می‌دهند. در شکل (۱۶) محدوده فرکانس‌ها و مقیاس‌های هندسی شبیه‌سازی بهینه با توجه به عدم بزرگنمایی دو معیار دامنه شتاب

## ۶- مراجع

- [1] Wood, D.M. (2004). *Geotechnical modeling*, [Version 2.2]. London: Taylor & Francis Group.
- [2] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. New Jersey: Prentice-Hall.
- [3] Gazetas, G., and Dakoulas, P. (1992). Seismic analysis and design of rockfill dams: State-of-the-art. *Soil Dyn Earthq Eng*, 11, 27-61.
- [4] Ambraseys, N.N., and Sarma, S.K. (1967). The response of earth dams to strong earthquakes. *Geotechnique*, 17, 181-213.
- [5] Yaseri, A., Konrad, J.M. (2020). Estimation of Natural periods of Earth Dam-Flexible canyon systems with 3D coupled FEM-SBFEM. *Comp Geotech*, 123, 103546.
- [6] Lekshmy, P.R., Raghukanth, S.T.G. (2021). A hybrid genetic algorithm-neural network model for power spectral density compatible ground motion prediction. *Soil Dyn Earthq Eng*, 142, 106528.
- [7] Koo, K.Y., Cho, S.G., Cui, J., Kim, D. (2010). Seismic response prediction for cabinets of nuclear power plants by using impact hammer test. *Nuclear Engineering and Design*, 240, pp. 2500-2511.
- [8] Niu, Z. (2021). Two-step structural damage detection method for shear frame structures using FRF and Neumann series expansion. *Mech Sys Sign Proc* 149, 107185.
- [9] Sun, W., Wang, Z., Yan, X., Zhu, M. (2018). Inverse identification of the frequency-dependent mechanical parameters of viscoelastic materials based on the measured FRFs. *Mech Sys Sign Proc* 98, 816-833.
- [10] Sharafi, H., Shams Maleki, Y. (2019). Evaluation of the lateral displacements of a sandy slope reinforced by a row of floating piles: A numerical-experimental approach. *Soil Dyn Earthq Eng*, 122, 148-170.
- [11] Altunisik, A.C., Kalkan, E., Okur, F.Y., Ozgan, K., Karahasan, O.S., Bostanci, A. (2019). Non-destructive modal parameter identification of historical timber bridges using ambient vibration tests after restoration. *Measurement*, 146, 411-424.
- [12] Sahare, A., Tanaka, Y., Ueda, K. (2020). Numerical study on the effect of rotation radius of geotechnical centrifuge on the dynamic behavior of liquefiable sloping ground. *Soil Dyn Earthq Eng*, 138, 106339 (2020).

نمایی شتاب باعث بروز تشدید و گسیختگی قبل از موعد در مدل فیزیکی شده، که بیشتر در مطالعات آزمایشگاهی غیرمطلوب و غیرقابل اندازه‌گیری است. در این تحقیق محدوده فرکانس‌های بهینه با توجه به اندازه‌گیری‌ها، برای مدلسازی فیزیکی میدان شتاب 1g پیشنهاد شده است. این محدوده‌ها و مقادیر فرکانسی، با توجه به محدودیت‌های مختلفی از قبیل نوع جعبه قوی، زاویه شیب، دانسیته نسبی ماسه، اثر فرکانس واقعی مولفه‌های افقی زلزله‌ها و ... ارائه شده اند.

بر اساس یافته‌های مطالعه حاضر، هر چه قدر زاویه شیب‌های ماسه‌ای مدل (با حفظ ارتفاع آنها) افزایش یافته، مقادیر بزرگنمایی پاسخ شتاب ضربه، در محدوده کامل فرکانسی (یعنی تا ۱۵۰ هرتز و در مدل های 1g) کاهش پیدا کرده است. علت اصلی این پدیده، به دلیل کاهش حجم مصالح شیب در حین افزایش زاویه شیب (با ثبوت ارتفاع آن) بوده است. در واقع، این مصالح ماسه است، که باعث رخداد بزرگنمایی شتاب در ارتفاع شیب می‌شوند و هر چقدر از میزان مصالح کاسته شود، بزرگنمایی پاسخ شتاب ضربه نیز به همان مقدار کمتر شده و رفتار مدل در حوزه شتاب به رفتار جعبه خالی نزدیک‌تر می‌شود.

محدودیت‌های اجرایی تحقیق حاضر، که باعث افزایش چشمگیر حجم و زمان اجرای مراحل مختلف تحقیق می‌شوند، شامل بررسی آثار جنس مصالح تشکیل دهنده جعبه قوی (مانند فولاد، آلومینیوم، پلکسی گلس و ...)، ضخامت اجزای جعبه (تغییرات سختی و ممان اینرسی جعبه)، ابعاد کلی جعبه، تراکم نسبی ماسه خشک، یا حتی اثر میزان درجه اشباع و درصد رطوبت خاک ماسه‌ای است، که هر یک می‌تواند موضوع تحقیقات آتی، برای شناخت هر چه بیشتر این موضوع باشد.

- performance of pile reinforced slopes. *J Geotech Geoenviron Eng*, 140(6), 1-13.
- [24] Wang, L.P., Zhang, G., Zhang, J.M. (2011). Centrifuge model tests of geotextile-reinforced soil embankments during an earthquake. *Geotext Geomem*, 29(3), 222-32.
- [25] Al-Defae, A.H., Caucis, K., Knappett, J.A. (2013). After shocks and the whole-life seismic performance of granular slopes. *Geotechnique*, 63(14), 1230-44.
- [26] Zhang, F., Gao, Y., Wu, Y., Zhang, N., Qiu, Y. (2016). Effects of vertical seismic acceleration on 3D slope stability. *Earthq Eng Eng Vib*, 15(3), pp.487-94.
- [27] Davies, M.C.R. (1981). Centrifuge modelling of embankments on clay foundations. PhD Thesis London, UK: University of Cambridge.
- [26] Ueno, K. (1998). Methods for preparation of sand samples. Proceedings of 1998 international conference of centrifuge. vol. 98, 1047-56. 2.
- [27] PEER (2021). Strong ground motion database. NGA-West2. <http://peer.berkeley.edu>.
- [28] American society for testing and materials (1999). Annual book of ASTM standards, sec. 4, vol. 04.08, west Conshohoken Pa.
- [29] Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, T. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *J Geotech Eng*, 112, 1016-1032.
- [30] NI (2021). National Instruments Corp. <http://www.ni.com/.2021>.
- [13] Chortis, G., Askarinejad, A., Prendergast, L.J., Li, Q., Gavin, K. (2020). Influence of scour depth and type on p-y curves for monopoles in sand under monotonic lateral loading in a geotechnical centrifuge. *Ocean Eng*, 106838.
- [14] Gaudin, C., Cassidy, M.J., Bienen, B., Hossain, M.S. (2011). Recent contributions of geotechnical centrifuge modeling to the Understanding of jack-up spudcan behavior. *Ocean Eng*, 38, 900-914.
- [15] Hussien, M.N., Tobita, T., Iai, S., Karray, M. (2016). Soil-pile-structure kinematic and inertial interaction observed in geotechnical centrifuge experiments", *Soil Dyn Earthq Eng*, 89, 75-84.
- [16] Liang, T., Bengough, A.G., Knappett, J.A., Muir Wood, D., Loades, K.W., Hallett, P.D., Boldrin, D., Leung, A.K., Meijera, G.J. (2017). Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge. *Ecological Engineering*, 109(B), 207-227.
- [17] Noble, T.E., Dixon, J.M. (2011). Structural evolution of fold-thrust structures in analog models deformed in a large geotechnical centrifuge. *J Struct Geolo*, 33, 62-77.
- [18] Zhang, G., Hu, Y., Zhang, J.M. (2009). New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests. *Measurement*, 42, 87-96.
- [19] Zhang, L.L., Tang, W.H., and Zhang, L.M. (2009). Bayesian Model Calibration Using Geotechnical Centrifuge Tests. *J Geotech Geoenvironm Eng*, 135(2).
- [20] Ghayoomi, M., Dashti, S., McCartney, J.S. (2013). Performance of a transparent Flexible Shear Beam container for geotechnical centrifuge modeling of dynamic problems. *Soil Dyn Earthq Eng*, 53, 230-239.
- [21] Lee, S.H., Choo, Y.W., Kim, D.S. (2013). Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests. *Soil Dyn Earthq Eng*, 44, 102-114.
- [22] Mason, H.B., Trombetta, N.W., Chen, Z., Bray, J.D., Hutchinson, T.C., Kutter, B.L. (2013). Seismic soil-foundation-structure interaction observed in geotechnical centrifuge experiments. *Soil Dyn Earthq Eng*, 48, 162-174.
- [23] Al-Defae, A.H., Knappett, J.A. (2014). Centrifuge modelling of the seismic

# Selection of optimal scale for physical modeling of dry sandy slope by laboratory study

Yazdan Shams Maleki<sup>1\*</sup>, Ali Akbar Akhtari<sup>2</sup>

1. Assistant professor, Kermanshah University of Technology (KUT), Kermanshah, Iran.

2. Assistant professor, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran.

y.shamsmaleki@kut.ac.ir\*

## Abstract

In this research, the free vibration or natural frequency analyzes have been performed with the help of small-scale physical models. Laboratory modeling in the geotechnical engineering can be performed in the acceleration field of 1g. In each of the physical modeling modes, the relationship between the model and prototype frequencies is very essential. In this paper, with the help of hammer impact pulse tests (HIPTs) - dynamic experiments- the optimal frequency ranges and the best geometric scales for physical modeling are investigated by a strongbox. The frequency range studied has been selected according to the study of shaking table models between 0.001Hz and 150Hz. To perform impact pulse tests, the physical models of dry sandy slope with different inclination angles from 25 to 60 degrees (and a constant slope height) have been instrumented by the piezoelectric acceleration sensors. The relative density of the sandy slope models is medium dense and about 50% to 52%. In addition to 8 physical models of sandy slopes, two models of level-ground and empty box have also been investigated. The time-history of the acceleration function of the input excitation shock at the slope floor (base point) and the response acceleration at the slope crest are recorded by the acceleration sensors. These acceleration time responses last for a short stroke (short impact) of less than 1.0 second duration. After extracting temporal responses, the frequency analyzes including transfer function (TF), Fourier response spectrum ratio (RFRS), and spectral energy density function (PSD-function) are derived from the temporal results. Using the transfer function or RFRS, quantitative values of natural frequencies of the physical model of the sandy slope and the strongbox are extracted in different vibration modes. According to the findings of the present study, for a constant slope model the frequencies at which the maximum seismic or dynamic energy is emitted are quite different from the frequencies with the maximum magnified response amplitude. The results of the present study prove the existence of a logic relationship between the sandy slope inclination angle (physical model natural frequencies) and the model response amplification frequency. So that by increasing the angle of inclination of the model slopes at a constant height, the magnification values of the impact acceleration response decrease. Because in general, the amount of sandy materials magnifies or weakens the amplitude of frequency responses. The presence of low sandy materials (on steep slope models) reduces the magnification range of the acceleration response and high sandy materials (on gentle slopes) increase the response range. Optimal frequencies in strong box modeling in the 1g acceleration field are frequencies that do not interfere with acceleration magnifications before or during seismic excitation (pre-seismic mode). Acceleration magnification causes resonance and premature failure in the physical model, which is generally undesirable and unmeasurable in laboratory studies. In this research, the optimal frequency range according to the measurements is proposed for the physical modeling of the 1g acceleration field. These ranges and frequency values are presented according to the various constraints such as the type of strong box, slope angle, relative density of sand, the actual frequency effect of the horizontal components of earthquakes, and so on.

**Keywords:** Hammer impact pulse test, resonant frequency, natural frequency, sandy slope, slope angle.