

طراحی و ساخت دستگاه تعیین پاسخ دینامیکی پی ماشین آلات و خصوصیات دینامیکی معادل بستر

رضا ذاکری (دانشجوی دکتری)

سید ناصر مقدس تفرشی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۳۷-۴۷، (پژوهشی)

ارتعاش حاصل از پی ماشین آلات، دامنه‌ی وسیعی از کرنش‌های برشی را در بستر ایجاد می‌کند. مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی بستر تابعی از دامنه‌ی کرنش برشی هستند؛ بنابراین، انتخاب مقادیر مناسب خصوصیات دینامیکی اخیر، متناسب با دامنه‌ی کرنش برشی غالب حاصل از اثر ارتعاش سیستم، اهمیت زیادی در طراحی پی ماشین آلات دارد. در نوشتار حاضر، طراحی و ساخت سیستم آزمایش مدل پی مرتعش (FMRT) با توانایی ایجاد دامنه‌ی وسیعی از کرنش‌های برشی در بستر مدنظر است. سیستم آزمایش FMRT، انجام آزمایش ارتعاش پایدار و آزاد و اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی پی و خصوصیات دینامیکی بستر را در سطوح مختلف کرنش برشی میسر می‌سازد. همچنین سیستم اخیر، قابلیت تولید ارتعاش هارمونیک سینوسی قائم، افقی و مایل خالص و ارتعاش هارمونیک ناشی از یک جرم دوار را دارد. در نوشتار حاضر، نمونه‌ی پی آزمایش‌های FMRT و کاربرد همبستگی نتایج آن‌ها ارائه شده است. از جمله قابلیت‌های دستگاه می‌توان به غیرمخرب بودن، تکرارپذیری، دقت، هزینه‌ی مناسب، زمان کوتاه انجام آزمایش، امکان کنترل خطاهای احتمالی و امکان استفاده در کارگاه و آزمایشگاه اشاره کرد.

واژگان کلیدی: پاسخ دینامیکی، ارتعاش، پی ماشین آلات، ارتعاش پایدار، ارتعاش آزاد.

rzakeri@email.kntu.ac.ir
nas_moghaddas@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

ساده‌ترین شکل از مدل‌سازی خاک بستر با در نظر گرفتن تعدادی فنر قائم مستقل به‌عنوان سختی خاک است. مدل وینکلر ضمن نادیده گرفتن میرایی خاک، فشار را در سطح تماس بین خاک و پی مستقیماً با تغییر شکل قائم آن مرتبط می‌داند. اما از آن‌جا که مدل وینکلر نمی‌تواند تنش‌های برشی را در نظر بگیرد، قادر به انتقال بار قائم وارد بر بستر به نواحی مجاور نیست. همچنین مدل وینکلر در تحلیل دینامیکی، میرایی ناشی از هندسه‌ی محیط و اندرکنش دینامیکی خاک و پی را نادیده می‌گیرد. با اضافه کردن یک میراگر به موازات فنر کشسان مدل وینکلر، مدلی دو پارامتری موسوم به مدل جرم - فنر - میراگر (MSD) ایجاد می‌شود.^[۶-۴] ریزنر^[۷] (۱۹۳۶)، از حل توسعه‌یافته‌ی لم^[۴] (۱۹۰۴)، برای ارتعاش نیروی متمرکز وارد بر نقطه‌ی پی در نیم‌فضای موسوم به مسئله‌ی دینامیکی بوسینسک^[۵] استفاده کرد.^[۸-۹] این حل مبتنی بر طراحی فونداسیون مرتعش را در نیم‌فضای شکل داد. ریزنر (۱۹۳۶)،^[۷] فرض کرد خاک زیر فونداسیون نیمه بی‌نهایت، همگن، همسان و کشسان بوده و تحت بار دینامیکی یک‌نواخت گسترده قرار گرفته است. وی از مدل جرم - فنر میراگر با یک درجه آزادی برای پیش‌بینی دامنه‌ی جابه‌جایی پی استفاده می‌کرد. لیسمر (۱۹۶۵)،^[۱۱] نظریه‌ی ریزنر را برای پی دایره‌ی صلبی، که بر نیم‌فضای کشسان متکی بود، تحت بارگذاری

از زمان ساخت اولین ماشین‌آلات مکانیزه‌ی صنعتی، مهندسان طراح به شناخت و کنترل جابه‌جایی ناشی از ارتعاش تجهیزات ذکر شده توجه داشته‌اند. با توسعه‌ی فناوری و افزایش بسامد کاربرد ماشین‌آلات، کاهش ابعاد و وزن ماشین و همچنین افزایش بازدهی و نیروی دینامیکی حاصل از عملکرد آن‌ها، شناخت روابط حاکم بر جابه‌جایی، سرعت، و شتاب پی و بستر آن‌ها اهمیت زیادی دارد. اولین مطالعات جهت ارائه‌ی روابط تجربی طراحی پی ماشین‌آلات صنعتی مرتعش، افزایش جرم پی را جهت کنترل دامنه‌ی ارتعاش‌ها پیشنهاد کرده‌اند.^[۳-۱] در خصوص برآورد خصوصیات دینامیکی خاک بستر با استفاده از یک ارتعاش‌گر، اولین بار توسط سازمان دژبو^[۱] (۱۹۳۹) در آلمان مطالعاتی انجام شد.^[۳-۱] از این رو با توسعه‌ی دانش فنی، مدل‌های تحلیلی متعددی نظیر: مدل وینکلر، جرم - فنر - میراگر (MSD)،^[۲] نظریه‌ی نیم‌فضای کشسان و مدل نیم‌فضای کشسان اصلاح شده جهت تحلیل و بررسی پاسخ دینامیکی پی‌های سطحی و مدفون توسعه داده شدند. مدل وینکلر،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۹/۲۳، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۷.

DOI:10.24200/J30.2020.55755.2771

دینامیکی پایدار^۷ توسعه داد. پی دایره‌یی لیسمر از حلقه‌های متمرکز با جابه‌جایی یکسان قادر به شبیه‌سازی فشار ثابت در زیر پی بود. مدل ایشان نیز با استفاده از مدل جرم - فنر - میراگر، دامنه‌ی جابه‌جایی پی را پیش‌بینی می‌کرد.

استفاده از روش‌های اخیر در صورتی می‌تواند پاسخ دینامیکی پی مرتعش را به‌درستی برآورد کند که مقادیر مناسبی از خصوصیات دینامیکی بستر انتخاب شود. خصوصیات دینامیکی خاک را می‌توان با نمونه‌برداری از بستر (انجام حفاری) و انجام آزمایش دینامیکی مناسب در آزمایشگاه برآورد کرد. آقایی آرابی و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۳] با استفاده از آزمایش ستون تشدید، اثر دست‌خوردگی در خصوصیات دینامیکی نمونه‌های خاک را بررسی کردند و نشان دادند که دست‌خوردگی نمونه‌ها می‌تواند موجب تغییر در خصوصیات دینامیکی خاک شود. علاوه بر این، تأثیر تغییر در میزان فشار همه‌جانبه و درصد رطوبت خاک حین نمونه‌گیری، در خصوصیات دینامیکی خاک مشهود بوده است. از این رو از یک طرف، انجام آزمایش روی نمونه‌های دست‌خورده یا حتی دست‌نخورده در مقیاس کوچک نمی‌تواند مبین خصوصیات دقیق خاک بستر باشد و از طرف دیگر، غالباً امکان ایجاد شرایط مرزی کاملاً مشابه با شرایط واقعی در محل ممکن نیست. بنابراین با توجه به وابستگی شدید خصوصیات دینامیکی خاک بستر به نوع نمونه‌گیری، تراکم، فشار سربار، اندازه‌ی نمونه و شرایط مرزی، انجام آزمایش روی بستر در محل حائز اهمیت است. هر چند آزمایش‌های صحرایی مانند آزمایش درون‌گمانه‌یی (که نیازمند حفاری است) و آزمایش میکروتومر خصوصیات دینامیکی خاک را بدون نمونه‌برداری و در شرایط حقیقی خاک برآورد می‌کنند؛ اما آزمایش‌های مذکور فقط قادر به ارائه‌ی خصوصیات دینامیکی خاک در دامنه‌ی بسیار کوچکی از کرنش برشی دینامیکی هستند. از آن‌جا که پی ماشین‌آلات از زمان شروع به کار (روشن شدن) رسیدن به بسامد کارکرد (که می‌تواند قبل یا بعد از بسامد تشدید رخ دهد) و توقف (خاموش شدن) طیف وسیعی از دامنه‌های کرنش برشی را در بستر ایجاد می‌کنند، بنابراین انتخاب مقدار مناسب خصوصیات دینامیکی خاک شامل مدول برشی و نسبت میرایی با توجه به دامنه‌ی کرنش برشی غالب، اهمیت زیادی در طراحی پی ماشین‌آلات دارد. از طرف دیگر، طراحی پی ماشین‌آلات بر اساس روابطی انجام می‌گیرد که عموماً با حل بازگشتی معادلات حرکت یک پی مرتعش حاصل شده است. از این رو مقادیر مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی، که در روابط مذکور مورد نظر هستند، الزاماً با مقادیر برآورد شده از آزمایش‌های صحرایی مانند میکروتومر و درون‌گمانه‌یی و آزمایش‌های معمول آزمایشگاهی مانند ستون تشدید و سه‌محوری دینامیکی (به دلیل تفاوت در فرضیات و معادلات حاکم بر سیستم آزمایش)، منطبق نیستند. با حل بازگشتی معادله‌ی حرکت یک مدل آزمایشگاهی یا صحرایی پی مرتعش می‌توان از یک‌سو بدون دست‌خوردگی و تغییر شرایط مرزی بستر، خصوصیات دینامیکی معادل بستر را برآورد کرد و از سوی دیگر، خصوصیات دینامیکی معادل ذکر شده را با همان فرضیاتی برآورد کرد که در طراحی پی ماشین‌آلات استفاده می‌شود. همچنین با تغییر وزن استاتیکی سیستم آزمایش و نیروی دینامیکی، امکان تغییر دامنه‌ی کرنش برشی دینامیکی و تخمین خصوصیات معادل دینامیکی خاک فراهم می‌شود. از این رو با در نظر گرفتن فرضیات مشابه با روش طراحی و شرایط مرزی حقیقی، پاسخ دینامیکی پی ماشین به‌عنوان هدف اصلی مطالعه با دقت بیشتری برآورد می‌شود. خصوصیات دینامیکی مصالح را می‌توان با اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی سیستم تحت ارتعاش پایدار و آزاد برآورد کرد.^[۱۳] ژینگ^۸ و همکاران (۲۰۲۰)^[۴۳] خصوصیات دینامیکی و میزان کارایی ورق لاستیک را به‌عنوان سیستم ایزولاسیون جهت استفاده در زیر لایه‌ی بالاست، به کمک آزمایش ارتعاش پایدار به دو روش عددی و آزمایشگاهی ارزیابی کردند. در دو دهه‌ی گذشته، پژوهش‌گران

مختلفی^[۱۷، ۱۱، ۲۰-۲۲، ۲۹، ۲۹، ۴۰، ۴۲] با ساخت مدل پی مرتعش، پاسخ دینامیکی را بررسی و خصوصیات معادل بستر آن را ارائه کردند. بایدیا و راتی^۹ (۲۰۰۴)^[۱۹] پاسخ دینامیکی پی مربعی به ضلع ۴۰۰ میلی‌متر را در گودال آزمایشی به ابعاد ۲ × ۲ متر در پلان و ۱٫۶۹ متر در عمق مطالعه کردند. خاک آزمایشی آنان، ماسه‌ی متوسط تا ریز با دانه‌بندی یکنواخت و رطوبت کمتر از ۱٪ بود. ایشان در مطالعات خود مقدار نیروی دینامیکی و وزن استاتیکی سیستم آزمایش را تغییر دادند. کرار و کریشنا،^{۱۰} (۲۰۱۶)^[۳۷] نیز با انجام تعدادی آزمایش ارتعاش قائم پایدار روی بلوک پی متکی بر بستر طبیعی، تأثیر نیروهای دینامیکی مختلف را در پاسخ دینامیکی مدل پی بررسی کردند. مندل^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۲)^[۲۹] هم پاسخ دینامیکی پی مربعی به بُعد ۴۰۰ میلی‌متر را در گودالی مشابه مطالعات بایدیا و راتی مطالعه کردند و اثر قرارگرفتن لایه‌ی با سختی کمتر (خاکستر بادی) را در لایه‌ی با سختی بیشتر (خاک شنی) (یا به ترتیب برعکس) مطالعه کردند. یوجاوالا^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۹)^[۴۲] با استفاده از آزمایش مدل پی مرتعش، تعدادی آزمایش ارتعاش پایدار قائم در چاله‌ی آزمایش روی بستر مسلح با یک لایه‌ی ژئوگرید انجام دادند. مبالوا و همکاران (۲۰۱۷)^[۱۷] نیز پاسخ دینامیکی یک پی مرتعش بزرگ‌مقیاس را با انجام آزمایش ارتعاش پایدار به‌کمک یک ارتعاش‌گر هارمونیک بررسی کردند. در مدل پی مرتعش استفاده شده در تمامی مطالعات پیشین^[۱۷، ۱۱، ۲۰-۲۲، ۲۹، ۳۷، ۴۰، ۴۲] سرعت زاویه‌یی سیستم ارتعاش به کمک سیستم‌های مکانیکی، مانند تاکومتر و با اندازه‌گیری سرعت دوران شفت سیستم ارتعاش اندازه‌گیری شده است. همچنین وزن استاتیکی سیستم ارتعاش نیز با استفاده از ورق فلزی تأمین شده است. پژوهش‌گران اشاره شده، به‌منظور کاهش ارتعاش ناخواسته‌ی ناشی از برخورد ورق‌ها به یکدیگر از ورق لاستیک بین ورق‌های فلزی استفاده کرده‌اند. اما از یک طرف، استفاده از ورق لاستیک سبب کاهش بازدهی سیستم آزمایش شده و از طرف دیگر، موجب ایجاد سیستم چند درجه آزادی شده بود. در این حالت، تطابق نظریه‌ی معادله‌ی حرکت آن با یک سیستم یک درجه آزادی کنترل‌شده‌ی نبوده و در هیچ یک از مطالعات مذکور در خصوص آن بحثی نشده است. موقعیت قرارگرفتن حسگرهای اندازه‌گیری شتاب و ژئوفون در مدل پی مرتعش استفاده شده در مطالعات پیشین مذکور، به‌طور محدود و در جداری پی بوده است. بنابراین در صورت وقوع مودهای ثانویه ارتعاش، مانند ارتعاش گهواره‌یی، پاسخ دینامیکی برداشت شده تحت تأثیر قرار گرفته بود و با توجه به نبود روش مناسب برای اندازه‌گیری و کنترل مودهای ثانویه و ناخواسته‌ی ارتعاش، صحت نتایج در هر آزمایش نشده بود. از طرف دیگر، با توجه به برداشت پاسخ پی مرتعش، خصوصیات دینامیکی معادل برآورد شده برای سیستم پی - بستر معتبر بوده و تحت تأثیر توده‌ی پی نیز قرار داشته است. در حالی که در صورت برآورد پاسخ بستر (مستقل از پی)، علاوه بر کنترل اختلاف پاسخ پی و بستر، تعیین خصوصیات دینامیکی بستر نیز ممکن می‌شد، که این امکان در مطالعات پیشین اشاره شده فراهم نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، طراحی و ساخت یک سیستم ارتعاش مدل پی با هدف اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی پی مرتعش و تخمین خصوصیات دینامیکی معادل بستر مد نظر است، به نحوی که ساختار قابل سرهم شدن (ماژولار) سیستم آزمایش، سبب ایجاد ارتعاش‌های ناخواسته و تغییر معادلات حاکم بر سیستم یک درجه آزادی نشود. همچنین با استفاده از حسگرهای مناسب در نقاط کلیدی و پردازش صحیح داده‌ها، امکان اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی سیستم ارتعاش و خصوصیات دینامیکی بستر، با کمترین وزن استاتیکی و بدون ایجاد خطای غیرقابل قبول فراهم شود. سیستم آزمایش مورد نظر در نوشتار حاضر با عنوان «دستگاه آزمایش تعیین پاسخ دینامیکی مدل پی مرتعش» یا به اختصار دستگاه FMRT^{۱۳} معرفی شده

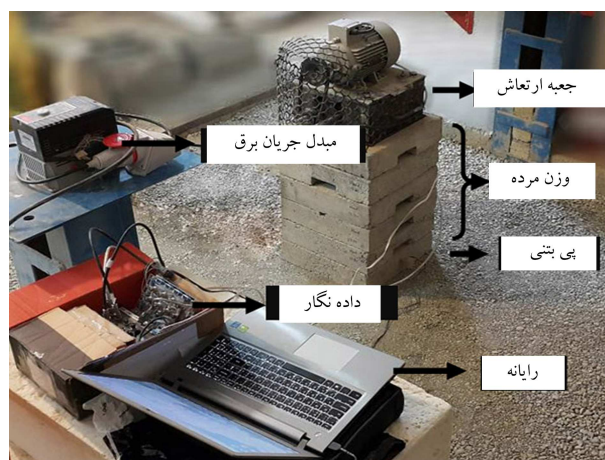
است. بی دستگاه آزمایش FMRT از نوع بلوکی و نوع ارتعاش آن سیکلی بوده است.

۲. اجزاء سیستم آزمایش

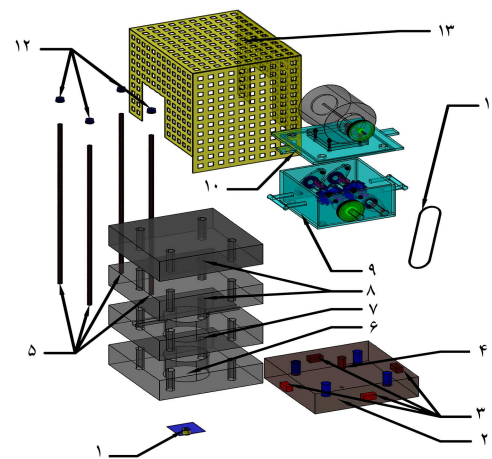
در شکل ۱، تصویری از سیستم آزمایش FMRT مشاهده می‌شود و اجزاء آن در دو بخش سیستم بارگذاری (بخش ۱.۲) و سیستم ثبت و قرائت داده (بخش ۲.۲) تشریح شده‌اند.

۱.۲. سیستم بارگذاری

سیستم بارگذاری دستگاه FMRT نقش اعمال نیروهای دینامیکی (ارتعاش) و استاتیکی (بار مرده) را به سطح بستر بر عهده دارد. در شکل ۲، اجزاء سیستم بارگذاری FMRT مشاهده می‌شود.



شکل ۱. سیستم آزمایش FMRT و اجزای تشکیل دهنده آن.

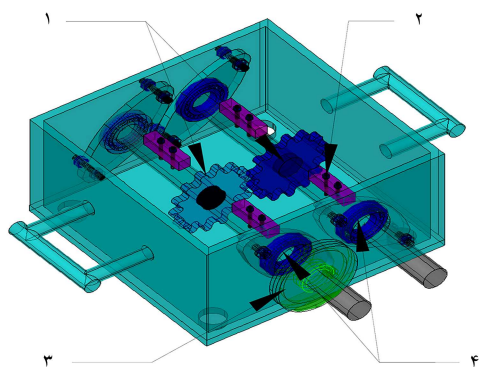
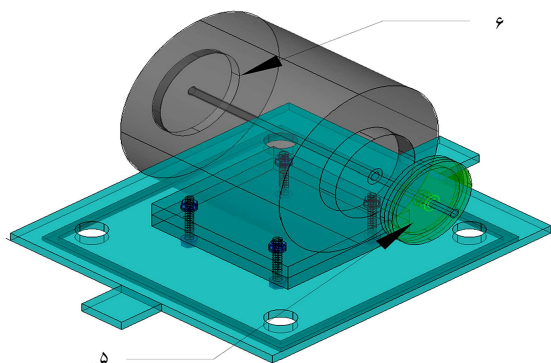


شکل ۲. سیستم بارگذاری FMRT، شامل (۱) حسگر برداشت پاسخ بستر، (۲) پی بتنی، (۳) حسگرهای شتاب‌سنج جانبی پی، (۴) حسگر شتاب‌سنج/ ژئوفون مرکز پی، (۵) مهارهای یک‌پارچه‌کننده، (۶ و ۷) بلوک‌های وزنی شامل حفره جهت استقرار حسگر مرکز پی، (۸) بلوک وزنی، (۹) جعبه‌ی ارتعاش، (۱۰) درب جعبه‌ی ارتعاش، (۱۱) تسمه‌ی انتقال گشتاور موتور به شفت جعبه‌ی ارتعاش، (۱۲) پیچ و مهره و (۱۳) محافظ جعبه‌ی ارتعاش.

۱.۱.۲. واحد ایجاد نیروی دینامیکی

نیروی دینامیکی از نوع ارتعاش با جرم دوار در جعبه‌ی ارتعاش ایجاد می‌شوند. مطابق شکل ۳، دو شفت موازی در جعبه‌ی ارتعاش، در میانه به وسیله‌ی دو چرخ دنده‌ی مشابه به نحوی به یکدیگر متصل شده‌اند که چرخش ساعت‌گرد یک شفت، سبب چرخش پاد ساعت‌گرد شفت دیگر شود. نیروی دینامیکی به کمک نیروی خارج مرکز ۴ وزنه واقع بر روی دو شفت ایجاد می‌شود. وزنه‌های ذکر شده به کمک پیچ در موقعیت متقارن یا پاد متقارن در ۴ طرف شفت قابل اتصال هستند، به طوری که می‌توان با قرار دادن ۴ وزنه‌ی مشابه، تنش با توزیع ثابت و با قرار دادن وزنه‌های متفاوت، تنش با توزیع خطی روی بستر اعمال کرد. همچنین امکان تغییر زاویه‌ی برآیند نیروی دینامیکی با تغییر زاویه‌ی محور یک شفت نسبت به شفت دیگر نیز وجود دارد (این امر با باز کردن یک شفت و چرخاندن آن به مقدار دلخواه و تغییر زاویه‌ی تقارن وزنه‌ها روی دو شفت موازی امکان‌پذیر است). به‌عنوان مثال، جهت ایجاد ارتعاش قائم هماهنگ سینوسی خالص با توزیع تنش ثابت روی بستر، باید ۴ وزنه‌ی مشابه دارای خروج از مرکزیت با چیدمان متقارن در ۴ طرف دو شفت سیستم آزمایش به‌صورت پاد متقارن متصل شوند. از این رو حرکت ساعت‌گرد یکی از شفت‌ها موجب حرکت پاد ساعت‌گرد شفت دیگر می‌شود، به طوری که برآیند نیروهای قائم حاصل از دوران وزنه‌های دارای خروج از مرکزیت با هم جمع و برآیند نیروی‌های افقی آن از هم کسر (و برابر صفر) خواهند شد.

مطابق شکل ۳، نیروی لازم جهت دوران شفت سیستم ارتعاش به کمک یک الکتروموتور AC با قدرت ۳ اسب بخار و بسامد ۵۰ هرتز مستقر بر روی جعبه‌ی



شکل ۳. اجزاء جعبه‌ی ارتعاش شامل: (۱) دو چرخ دنده‌ی مشابه در وسط شفت، (۲) وزنه‌های دارای خروج از مرکزیت، (۳) پولی متصل به شفت، (۴) دو شفت موازی، (۵) پولی متصل به الکتروموتور و (۶) الکتروموتور.

شامل: پی، بلوک‌های بتنی و جعبه‌ی ارتعاش بر هم و هم‌سویی با مرکز سطح پی می‌شود. همچنین مرکز جرم وزنه‌های دارای خروج از مرکزیت به‌عنوان عامل ایجاد نیروی دینامیکی بر مرکز سطح پی منطبق است. از این رو احتمال ایجاد مودهای ثانویه‌ی ارتعاش، نظیر ارتعاش افقی و گهواره‌یی سیستم ناچیز خواهد شد.

۲.۲. حسگرهای استفاده شده

برای قرائت پاسخ ارتعاش از دو نوع حسگر شتاب‌سنج و ژئوفون استفاده شده است. شتاب‌سنج استفاده شده از نوع ADXL - ۳۴۵ با محدوده‌ی اندازه‌گیری $\pm 16g$ ، محدوده‌ی غیرخطی $\pm 0.5\%$ ، خطای زاویه‌ی انحراف محور ± 0.1 و ابعاد بسیار کوچک (متصل روی برد مدار الکترونیکی به ابعاد 2×1 سانتی‌متر) است. ژئوفون استفاده شده نیز از نوع SM - ۲۴ با باند بسامدی 10 تا 240 هرتز با قابلیت تحمل بسامد $\pm 2.5\%$ ، به شکل استوانه‌یی با قطر $25/4$ و ارتفاع 32 میلی‌متر است. اگرچه حسگرهای شتاب‌سنج مطابق دستورالعمل سازنده «خودکالیبره» هستند، با این حال با توجه به امکان اندازه‌گیری شتاب جاذبه g می‌توان آن‌ها را پیش از انجام هر آزمایش کالیبره کرد. تنظیم (کالیبراسیون) حسگر ژئوفون نیز بعد از انجام تعدادی آزمایش در آزمایشگاه تخصصی انجام می‌شود. با توجه به اطلاعات مندرج در بروشور حسگر ژئوفون، حساسیت ژئوفون در بسامدهای کمتر از 10 هرتز کم است و با افزایش بسامد (در محدوده 1 تا 10 هرتز)، میزان حساسیت آن به‌صورت تقریباً خطی تا میزان 20 میلی‌ولت بر ثانیه افزایش می‌یابد. تغییر در میزان حساسیت ژئوفون در محدوده‌ی بسامدهای کمتر از 10 هرتز (در مواردی کمتر از 8 هرتز)، مبین عدم دقت کافی آن در محدوده‌ی بسامدی کمتر از 10 هرتز است و معمولاً در محدوده‌ی اخیر با توجه به کم بودن بسامد، از حسگرهای سنجش جابه‌جایی (LVDT) استفاده می‌شود. اما در محدوده‌ی بسامد بیش از 10 هرتز (برای مدل پی موردنظر در پژوهش حاضر، بسامد در محدوده‌ی 10 تا 70 هرتز است)، مقدار حساسیت ژئوفون تقریباً برابر مقدار ثابت 20 میلی‌ولت بر ثانیه و مستقل از بسامد ارتعاش است. عدم تغییر حساسیت حسگر ژئوفون در محدوده‌ی باند بسامدی 10 تا 240 هرتز، مبین دقت آن و عدم تغییر ضریب کالیبراسیون ژئوفون است، که این مهم از مزایای مهم آن به‌شمار می‌آید. لذا با توجه به محدوده‌ی بسامد 10 تا 70 هرتز در پژوهش حاضر، حسگر ژئوفون، دقت مناسبی دارد. در سیستم آزمایش پژوهش حاضر، حسگر ژئوفون به وسط پی (مطابق موقعیت ۴ شکل ۲) و حسگرهای شتاب‌سنج به وسط پی و دیواره‌های جانبی آن (مطابق موقعیت‌های ۳ و ۴ در شکل ۲) متصل شده‌اند. تکرارپذیری نتایج، مبین عملکرد مناسب حسگرهاست.

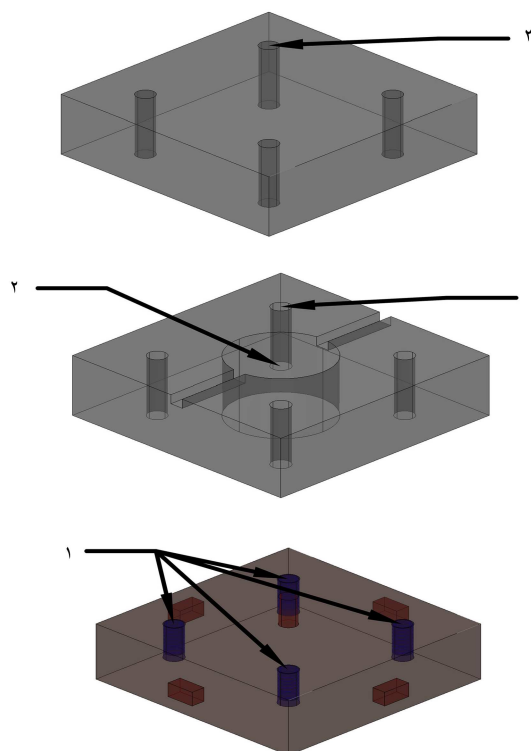
۳.۲. سیستم ثبت داده

اطلاعات خروجی حسگرها به کمک یک سیستم ثبت داده‌های دینامیکی با ۸ کانال با قابلیت نمونه‌برداری ۶۴ هزار داده در ثانیه ثبت می‌شود. به‌منظور کنترل ارتعاش‌های ثانویه، مطابق شکل ۵، حسگرهای شتاب‌سنج سه‌محوره در کناره‌ی پی مستقر می‌شوند و شتاب‌های قائم و افقی پی را اندازه‌گیری می‌کنند. از آن‌جا که ارتعاش قائم مستقل از سایر مودهای ارتعاش است،^[۲۱] مطابق شکل ۵ با نصب یک شتاب‌سنج و یک ژئوفون (به‌منظور افزایش دقت به‌خصوص در بسامدهای کم ارتعاش) در مرکز پی، پاسخ دینامیکی قائم سیستم مرتعش مستقل از سایر مودهای ارتعاش برداشت می‌شود. همچنین مطابق شکل ۴، به‌منظور امکان استقرار حسگرها

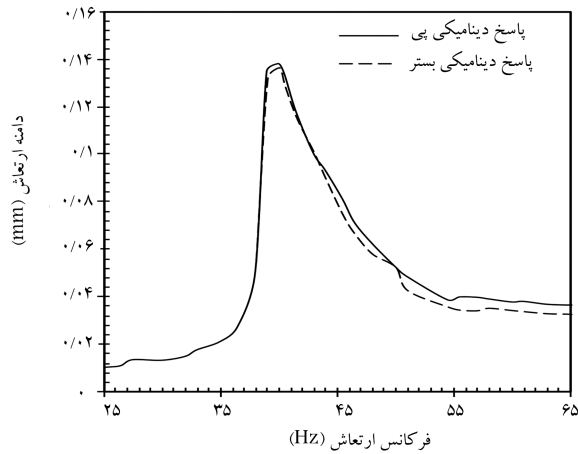
ارتعاش فراهم شده است. انتقال نیرو از الکتروموتور به شفت نیز به کمک سیستم انتقال نیروی تسمه و محور انجام شده است. بسامد موتور نیز با استفاده از یک میدل برق (اینورتور)، مطابق شکل ۳ با مشخصات مشابه الکتروموتور (توان ۳ اسب و بسامد هرتز) قابل تغییر بوده است. از این رو می‌توان بسامد کارکرد موتور را در محدوده‌ی 0 تا 50 هرتز (0 تا 3000 دور بر دقیقه) و بسامد ارتعاش را با استفاده از اندازه‌های مختلف (سیستم انتقال نیروی پولی و تسمه) تا مقدار دلخواه تغییر داد. با استفاده از سیستم مذکور، بسامد سیستم ارتعاش در محدوده‌ی 10 تا 70 هرتز (600 تا 4200 دور بر دقیقه) به دقت قابل کنترل است. از آن‌جا که بسامد برق بسیاری از کشورها 50 هرتز است، محدوده‌ی بسامد ذکر شده، شامل بسیاری از الکتروموتورهای صنعتی نیز می‌شود.

۲.۱.۲. واحد ایجاد نیروی استاتیکی

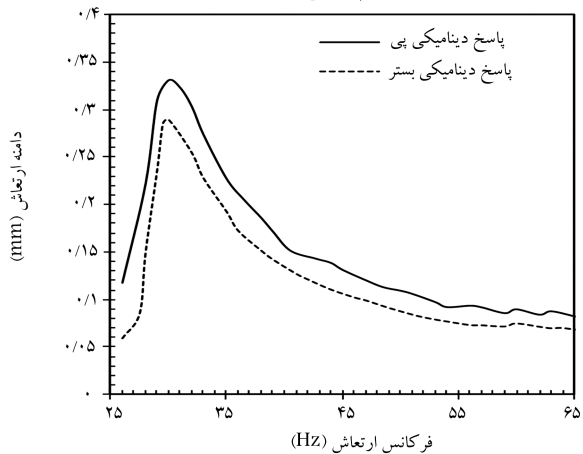
وزن استاتیکی سیستم با بلوک‌های بتنی مسلح مقاومت بالا تأمین شده است، که با وزن و ابعاد مشابه و همچنین با سطح کاملاً تراز و افقی می‌تواند بدون لغزش (به واسطه‌ی اصطکاک میان بلوک‌های بتنی) روی هم قرار گیرند. علاوه‌بر این، به‌منظور یک‌پارچگی و هم‌مرکز شدن سیستم، در میانه‌ی بلوک‌های بتنی اشاره شده و جعبه‌ی ارتعاش، ۴ حفره‌ی متقارن (مطابق شکل ۴) جهت عبور مهارها و اتصال بلوک‌ها به یکدیگر فراهم شده است. مطابق شکل ۲، مهارهای مذکور با عبور از میانه‌ی جعبه‌ی ارتعاش و بلوک‌های بتنی، از پایین به مهارهای موجود در پی بتنی مسلح و از بالا به قسمت فوقانی ارتعاش‌گر مهار شده‌اند. این امر موجب یک‌پارچگی سیستم ارتعاش و انطباق مرکز جرم تمام اجزاء،



شکل ۴. واحد تأمین نیروی استاتیکی، شامل: (۱) مهار موجود در بلوک پی، (۲) حفره در میانه‌ی وزنه‌های استاتیکی جهت استقرار حسگر در میانه‌ی سطح پی، (۳) چهار حفره‌ی متقارن روی بلوک‌های وزنی بتنی جهت یک‌پارچه ساختن سیستم ارتعاش به کمک مهار.



الف) وزن استاتیکی کافی سیستم و پاسخ دینامیکی مشابه پی و بستر؛



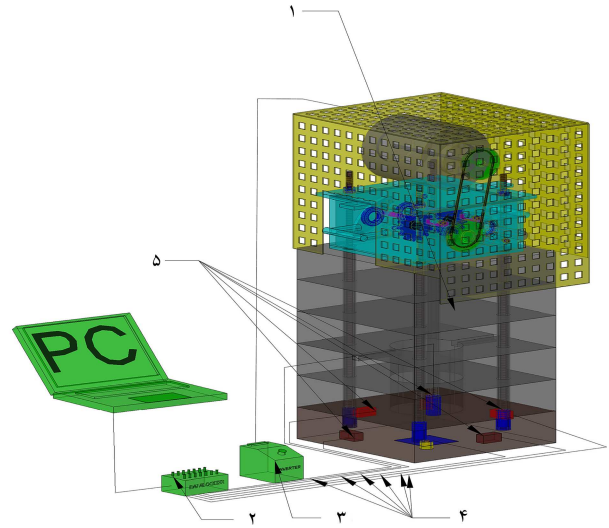
ب) وزن استاتیکی ناکافی سیستم و پاسخ دینامیکی متفاوت پی و بستر.

شکل ۷. نمونه‌یی از پاسخ دینامیکی پی و بستر.

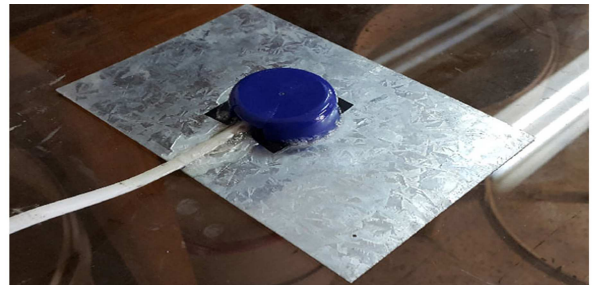
مطابق شکل‌های ۷ - الف و ۷ - ب، به ترتیب نمونه‌یی از پاسخ دینامیکی پی و بستر در حالت وجود و عدم وجود وزن کافی استاتیکی سیستم مشاهده می‌شود، که مطابق آن‌ها، در شکل ۷ - الف پاسخ دینامیکی پی و بستر یکسان و در شکل ۷ - ب، پاسخ دینامیکی پی و بستر متفاوت است.

اختلاف پاسخ پی و بستر آن در هیچ‌یک از سیستم‌های مشابه در برخی مطالعات پیشین، [۱۷، ۱۱، ۲-۲۲، ۲۰-۲۲، ۲۹، ۳۷، ۴۰، ۴۲] قابل کنترل نبوده و در آن‌ها، فقط با افزایش وزن استاتیکی سیستم سعی بر جلوگیری از جدا شدن پی از بستر بوده است. این موضوع در مطالعه‌ی پاسخ دینامیکی در حالت تشدید اهمیت زیادی دارد، زیرا در این حالت، T_p (تابع انتقال) ^{۱۴} و به عبارتی، نیروی دینامیکی وارد بر بستر به شدت افزایش می‌یابد. از این رو در مطالعات اشاره شده، [۱۷، ۱۱، ۲-۲۲، ۲۰-۲۲، ۲۹، ۳۷، ۴۰، ۴۲] همواره در سیستم آزمایش امکان جدایش پی از بستر و ایجاد خطا در برآورد پاسخ دینامیکی وجود داشته است.

از آن‌جا که دستگاه FMRT، یک سیستم آزمایشگاهی - پژوهشی است، می‌توان پاسخ دینامیکی پی را تا زمان جدا شدن کامل آن از بستر (تساوی نیروی دینامیکی و وزن استاتیکی) مطالعه کرد. در صورتی که سختی بستر، بسیار زیاد باشد و وزن استاتیکی سیستم ارتعاش، نیز کم و نیروی خروج از مرکز آن زیاد باشد، دامنه‌ی تشدید قابل توجه خواهد بود. در این حالت، حتی امکان مشاهده‌ی پرش‌های بلوک پی (کوبش و ضربه‌زدن پی بر بستر) در مجاورت بسامد تشدید به وضوح وجود



شکل ۵. اجزاء سیستم بارگذاری و سیستم ثبت و قرائت داده‌ی FMRT، شامل: (۱) سیستم بارگذاری، (۲) داده‌نگار، (۳) مبدل جریان، (۴) کابل و (۵) حسگرها.



الف) حسگر شتاب؛



ب) محل استقرار حسگر شتاب.

شکل ۶. تصویری از حسگر شتاب و نحوه استقرار آن.

در میانه‌ی پی، حفره‌یی در میانه‌ی دو بلوک بتنی مستقر روی پی ایجاد شده است.

مطابق شکل ۶ - الف، یک حسگر شتاب سه‌محوره (یا ژئوفون) روی یک ورق فولادی متصل بوده و توسط یک محافظ پلاستیکی به منظور جلوگیری از آسیب احتمالی محافظت شده است. مجموعه در مرکز پی و روی خاک مستقر شده است، به‌گونه‌یی که حسگر در پایین قرار گیرد (شکل ۶ - ب). با حسگر ژئوفون، ضمن تعیین پاسخ شتاب/سرعت/جاب‌جایی بستر پی تحت ارتعاش، می‌توان اختلاف پاسخ پی سیستم را از بستر آن مطالعه کرد. همچنین با توجه به مقادیر ثبت شده توسط حسگرها می‌توان میزان بسامد، نیروی دینامیکی و وزن استاتیکی متناظر با بلند شدن پی از بستر و کمینه‌ی میزان وزن استاتیکی و نیروی دینامیکی را برای اجتناب از این امر تعیین کرد.

خواهد داشت. در سایر موارد، تشخیص جدایی پی از بستر فقط به کمک ابزار دقیق قابل تشخیص است.

۳. تعیین بسامد ارتعاش و کنترل خطا

در سیستم آزمایش FMRT برای تعیین بسامد ارتعاش از روش تحلیل داده‌های خروجی حسگرها استفاده می‌شود. بنابراین برخلاف مطالعات پیشین اشاره شده، [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵] جهت تعیین بسامد ارتعاش نیازی به استفاده از تاکومتر (ابزار اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ی سیستم‌های دوار) یا سایر ابزارهای مشابه نیست و برای تعیین آن‌ها از داده‌های خام حسگرها به صورت هم‌زمان FFT گرفته می‌شود. در واقع، با کاهش ابزارهای اندازه‌گیری حین انجام آزمایش، امکان شناسایی اغتشاش در اندازه‌گیری‌ها و شناسایی مودهای ناخواسته‌ی ارتعاش به علت هرگونه نقص در عملکرد دستگاه میسر می‌شود.

FFT نام الگوریتمی برای تبدیل سریع، مستقیم و معکوس فوری‌ی گسسته است. یک تبدیل فوری‌ی سریع، یک رشته از مقادیر را به مؤلفه‌هایی با بسامدهای متفاوت تجزیه می‌کند. الگوریتم FFT، محتوای بسامدی هر ارتعاش را نشان می‌دهد. نمودار FFT ارتعاش هارمونیک با بسامد ثابت f_1 و دامنه‌ی $f(t) = x_1$ در صورت $X(t) = x_1$ به صورت یک خط ثابت است، که بسامد f_1 و تابعی از x_1 را نشان می‌دهد. در صورت هم‌زمان شدن ارتعاش اول با ارتعاش دوم هارمونیک با بسامد ثابت f_2 و دامنه‌ی $f(t) = x_2$ و $X(t) = x_2$ ، دامنه‌ی جابه‌جایی در ارتعاش با هم جمع خواهد شد؛ که در این حالت نمودار FFT خط ثابت دیگری را نیز در بسامد f_2 با دامنه‌ی تابعی از x_2 نشان خواهد داد. هر ارتعاش نامنظم را می‌توان به مجموعه‌ی از ارتعاش‌های هارمونیک با بسامد ثابت f_i و دامنه‌ی $X(t) = x_i$ نشان داد. در صورت ترسیم نمودار FFT مجموعه‌ی ذکر شده، محتوای بسامد ارتعاش شامل بسامد و تابعی از دامنه‌ی مودهای موجود در محتوای بسامد دریافت شده خواهد بود.

ارتعاش یک سیستم، که با هدف نوسان با بسامد مشخصی طراحی شده است، یک بسامد غالب (بسامد هدف) و بسامدهایی دیگر (نویز، پاسخ‌های محیط، نقص کاربرد دستگاه و ...) دارد. اگر از پاسخ یک سیستم مرتعش، FFT گرفته شود، نمودار آن به صورت یک منحنی خواهد بود. بسامد غالب ارتعاش، دامنه‌ی بزرگ‌تری دارد و سایر مودهای ارتعاش شامل نویزهای موجود، خطای ناشی از خروج از مرکز بودن دستگاه (که سبب ایجاد مودهای دوم و سوم ارتعاش، یعنی ارتعاش افقی و راکینگ می‌شود)، ارتعاش الکتروموتور، تداخل پاسخ بستر و منبع ارتعاش و سایر ارتعاش‌های دریافت شده از محیط پیرامونی و ... بسته به میزان تأثیرگذاری، دامنه‌ی کوچک‌تری خواهند داشت. هر چه اثر ارتعاش‌های ناخواسته شامل انعکاس و انکسار امواج، تداخل پاسخ‌ها، نویز و ... بیشتر باشد، دامنه‌ی نمودار FFT برای بسامد ناخواسته‌ی ذکر شده، بزرگ‌تر خواهد بود. نمایش هم‌زمان نمودار FFT داده‌های خروجی حسگرها، این امکان را میسر می‌سازد تا بسامد غالب ارتعاش را با دقت و بدون استفاده از ابزارهای ثانویه، مانند تاکومتر ارزیابی کرد. در سیستم آزمایش FMRT، هم‌زمان با انجام آزمایش از خروجی حسگرهای موجود FFT گرفته می‌شود. از این رو می‌توان بسامد ارتعاش‌گر، مودهای ناخواسته‌ی ارتعاش، و نویز سیستم را تشخیص داد. همچنین از آن‌جا که به صورت هم‌زمان، پاسخ دینامیکی پی مرتعش و بستر آن برداشت می‌شود، با بررسی نمودارهای FFT پاسخ به صورت هم‌زمان، می‌توان تداخل و تفاوت پاسخ پی منبع ارتعاش و بستر آن را بررسی و میزان

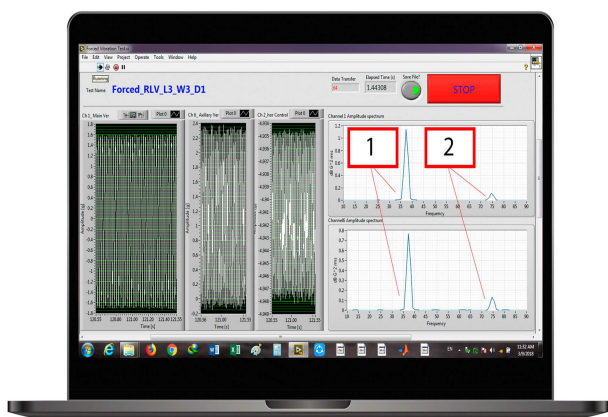
تأثیرگذاری هر مود ارتعاش و خطای حاصل در نتایج برداشت شده را ارزیابی کرد. نمونه‌ی از خروجی لحظه‌ی نرم‌افزار طراحی شده برای سیستم آزمایش FMRT در زمان انجام آزمایش در شکل ۸ مشاهده می‌شود. بسامد غالب (بسامد ارتعاش) و نویزهای موجود را می‌توان حین آزمایش در نمودارهای FFT مشاهده کرد.

۴. روش انجام آزمایش

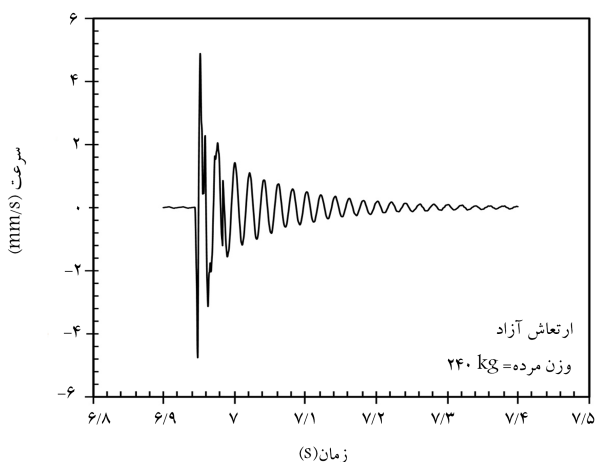
با استفاده از سیستم آزمایش FMRT می‌توان ضمن انجام دو نوع آزمایش ارتعاش پایدار و آزاد، پاسخ دینامیکی پی و بستر آن و همچنین خصوصیات دینامیکی معادل بستر را برای دامنه‌های کرنش برشی متفاوت مطالعه کرد.

به منظور انجام آزمایش ارتعاش آزاد، پس از استقرار سیستم ارتعاش (بدون جعبه‌ی ارتعاش) روی بستر و یک پارچه ساختن آن به کمک مهارها، با اعمال ضربه توسط یک چکش بر مرکز سیستم، پاسخ آن با استفاده از ژئوفون و شتاب‌سنج مستقر در مرکز پی و روی بستر ثبت می‌شود. در آزمایش‌های مذکور، سیستم با بسامد طبیعی شروع به ارتعاش می‌کند؛ اما به دلیل وجود میرایی، دامنه‌ی سرعت نوسان با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در شکل ۹، نمونه‌ی از تغییرات دامنه‌ی سرعت بر حسب زمان و روند میرا شدن آن در آزمایش ارتعاش آزاد مشاهده می‌شود.

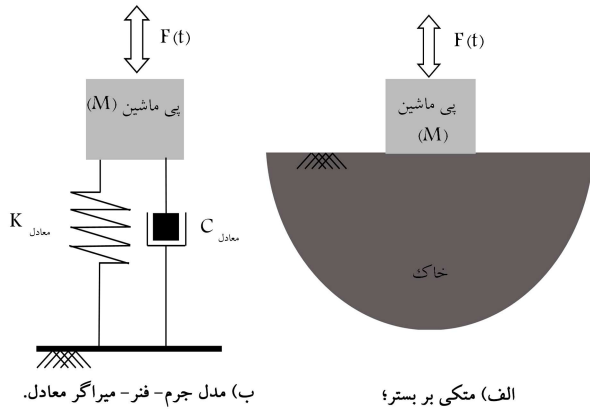
آزمایش ارتعاش پایدار، نوعی آزمایش ارتعاش اجباری است، که در آن با اعمال



شکل ۸. نمونه‌ی از صفحه‌ی نرم‌افزار طراحی شده: (۱) بسامدهای غالب (بسامد ارتعاش)، (۲) نویز و سایر مودهای موجود و میزان تأثیرگذاری آن‌ها.



شکل ۹. نمونه‌ی از خروجی حسگر سرعت با زمان در ارتعاش آزاد مدل پی مرتعش.



شکل ۱۱. مدل بی مرتعش.

۵. تحلیل نتایج

یک بی مرتعش متکی بر بستر کشسان تحت نیروی دینامیکی $F(t)$ را می توان مطابق شکل ۱۱ با استفاده از مدل جرم - فنر - میراگر (جرم M ، فنر با سختی K معادل K و میراگر با ضریب میرایی معادل c) مدل کرد. در ارتعاش پایدار با چرخش پادمقارن وزنه های خارج از محور مشابه، نیروی دینامیکی سینوسی قائم خالص به صورت $F(t) = \sum m_e \omega^i \sin(\omega t)$ ایجاد می شود. در رابطه ی اخیر، ω و e ، به ترتیب بیانگر مجموع جرم وزنه های خارج از محور، خروج از مرکزیت وزنه ها و بسامد زاویه یی ارتعاش هستند.

اگر شتاب، سرعت و جابه جایی بی مرتعش به ترتیب \ddot{z} ، \dot{z} و z باشند، معادله ی حرکت بی تحت ارتعاش پایدار مطابق رابطه ی ۱ بیان می شود. با حل معادله ی حرکت بی با توجه به شرایط مرزی مدل، مقادیر جابه جایی قائم، دامنه ی تشدید (و نسبت میرایی کل)، بسامد طبیعی و مدول برشی با توجه به نظریه ی نیم فضای کشسان اصلاح شده،^[۱] مطابق روابط ۲ الی ۵ محاسبه می شوند. در روابط اخیر، D نسبت میرایی کل $(D = \frac{c}{2\sqrt{km}})$ ، Z_{res} دامنه ی تشدید، Z دامنه ی جابه جایی قائم، f_{res} بسامد تشدید، f_n بسامد طبیعی، ω_n بسامد زاویه یی طبیعی، ν نسبت پواسون (فرض مقدار ۰٫۳ با فرض خاک دانه یی) و r_0 شعاع بی دایره یی معادل هستند.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F(t) \quad (1)$$

$$Z = \frac{\sum m_e e (\frac{\omega}{\omega_n})^i}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2D \frac{\omega}{\omega_n})^2}} \quad (2)$$

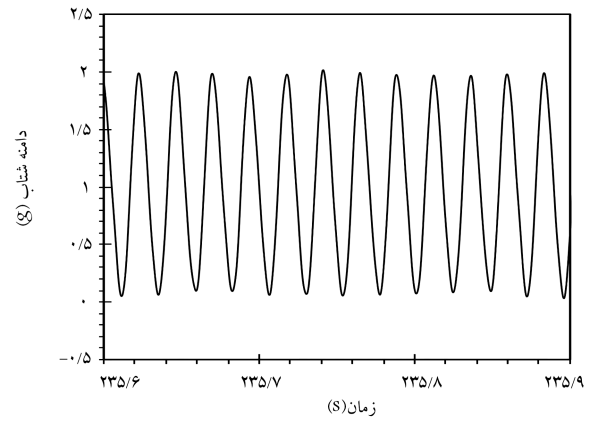
$$Z_{res} = \frac{\sum m_e e}{2D\sqrt{1 - D^2}} \quad (3)$$

$$f_n = f_{res} \sqrt{1 - 2D^2} \quad (4)$$

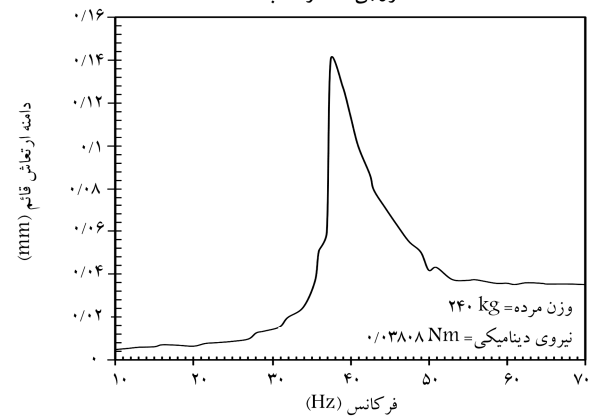
$$G = \frac{(1 - \nu)(2\pi f_{res})^2 m}{4r_0} \quad (5)$$

$$k = m(2\pi f_{res})^2 \quad (6)$$

در صورت تحریک بی تحت اثر یک ضربه در مرکز آن (ارتعاش آزاد)، نیروی دینامیکی $F(t)$ در معادله ی حرکت (رابطه ی ۱) برابر صفر است. به دلیل وجود میرایی در سیستم، دامنه ی نوسان به مرور کاهش و انرژی مستهلک می شود (شکل ۱۰). در حالت ارتعاش آزاد، بسامد طبیعی ارتعاش از رابطه ی ۷ و نسبت میرایی با توجه به



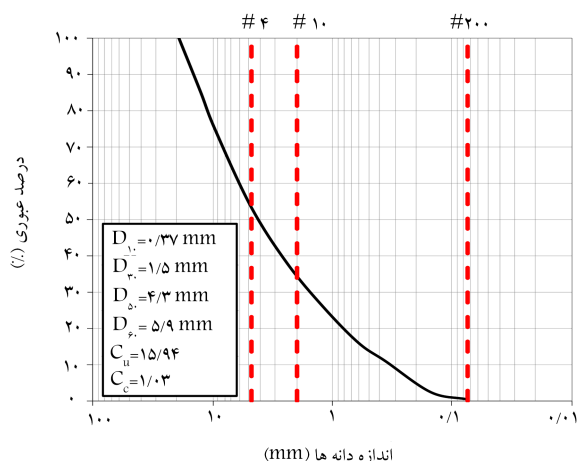
الف) خروجی حسگر شتاب؛



ب) تغییرات جابه جایی قائم بر حسب بسامد.

شکل ۱۰. نمونه ی نتایج آزمایش ارتعاش پایدار.

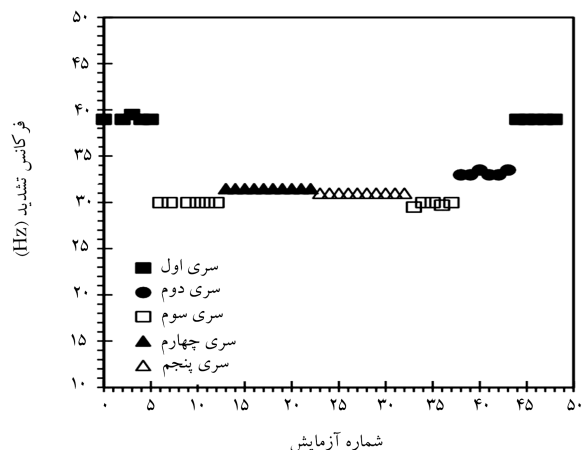
نیروی دینامیکی هارمونیک با بسامد ثابت به بستر، پاسخ دینامیکی بی و بستر (شامل شتاب، سرعت، یا جابه جایی) بعد از رسیدن به تعادل (پایدار شدن مقادیر پاسخ) قرائت می شود. با انجام آزمایش در بسامدهای مختلف ارتعاش می توان پاسخ دینامیکی بی را در دامنه ی مشخصی از بسامدهای ارتعاش ارزیابی کرد. جهت انجام آزمایش ارتعاش پایدار، بعد از آماده سازی بستر، بی سیستم ارتعاش روی خاک مستقر و کاملاً تراز شد. سپس بلوک های وزنی (بارهای مرده یا همان بار استاتیکی) و ارتعاشگر روی بی نصب و سیستم به کمک مهارها یک پارچه و هم مرکز شد. آزمایش با بسامد ارتعاش ۱۰ هرتز (۶۰ دور بر دقیقه) شروع و با پایدار شدن پاسخ بستر، خروجی حسگرها قرائت شد. سپس با افزایش بسامد بارگذاری به کمک میدل برق و ادامه ی ارتعاش، مجدداً پس از پایدار شدن پاسخ بستر، قرائت انجام گرفت. این فرایند با افزایش بسامد ارتعاش به میزان ۱ الی ۲ هرتز تا رسیدن به بسامد ۷۰ هرتز (۴۲۰۰ دور بر دقیقه) ادامه یافت. در شکل ۱۰ - الف، نمونه یی از پاسخ شتاب در بسامد ۴۳ هرتز (۲۵۸۰ دور بر دقیقه) مشاهده می شود. در پایان هر آزمایش، پاسخ سیستم به صورت نمودارهای دامنه ی شتاب (برای حسگر شتاب سنج) و سرعت (برای حسگرهای ژئوفون) بر حسب بسامد ارتعاش ترسیم شده است. به منظور تبدیل نمودارهای حاصل به نمودارهای استاندارد زنگی شکل جابه جایی بر حسب بسامد بارگذاری از شتاب، ۲ بار و از سرعت، ۱ بار انتگرال گرفته می شود. به عبارتی، داده های شتاب، ۲ بار بر بسامد زاویه یی آن و داده های سرعت، ۱ بار بر بسامد زاویه یی آن تقسیم می شوند. در شکل ۱۰ - ب، نیز نمونه یی از نمودار زنگی شکل تغییرات جابه جایی قائم بر حسب بسامد در ارتعاش پایدار مشاهده می شود.



شکل ۱۳. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌یی آزمایش شده.

شده نیز مطابق دستورالعمل ASTM D854^[۴۶]، برابر ۲٫۶۶ اندازه‌گیری شده است. همچنین با انجام آزمایش تراکم استاندارد مطابق دستورالعمل ASTM D6۹۸^[۴۷] مقدار بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه‌ی آن به ترتیب حدود ۲۰٫۴۲ کیلو نیوتن بر مترمکعب و ۵٫۱٪ به دست آمدند. زاویه‌ی اصطکاک آن نیز با انجام آزمایش سه‌محوری تحکیم نشده - زهکشی نشده (UU) روی نمونه‌هایی با وزن مخصوص خشک معادل ۹۴٪ و وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت ۲٪، برابر ۴۰٫۵ درجه به دست آمده است.

آزمایش‌های موردنظر با وزن استاتیکی (بار مرده) ۱۴۴ کیلوگرم تحت سه نیروی دینامیکی قائم خالص هارمونیک ۰٫۳۸۰۸، ۰٫۶۳۷۲ و ۰٫۹۷۴۴ نیوتن‌متر در حالت ارتعاش پایدار و تحت نیروهای دینامیکی کوچک‌تر با تحریک پی (سرعت اولیه‌ی ناشی از ضربه‌ی چکش به مرکز پی) در حالت ارتعاش آزاد روی مدل پی بتنی مربع با بعد ۴۰۰ میلی‌متر انجام شدند. آزمایش‌های اخیر در چاله‌یی به ابعاد ۲۵۰۰ × ۲۵۰۰ میلی‌متر در پلان و عمق ۸۴۰ میلی‌متر انجام شدند. بستر خاکی به ضخامت ۸۴۰ میلی‌متر درون چاله‌ی آزمایش در لایه‌های به ضخامت حدود ۲۱۰ میلی‌متر متراکم شد. به منظور تراکم لایه‌های بستر، سطح هر لایه‌ی خاک قبل از تراکم به صورت تقریبی با ابعاد چشمه‌ی ۳۰۰ میلی‌متری، شبکه‌بندی و سپس هر چشمه به کمک سیستم آزمایش FMRT (با پی مربعی بتنی به بعد ۴۰۰ میلی‌متر) و با وزن استاتیکی ۱۰۱ کیلوگرم و ثابت نیروی دینامیکی ۰٫۱۹۲ نیوتن‌متر در بسامدی نزدیک به بسامد تشدید (حدود ۴۰ هرتز (۲۴۰۰ دور بر دقیقه)) به مدت ۳۰ ثانیه متراکم شد. در روش FMRT، تراکم با ثابت نگه‌داشتن انرژی وارد بر بستر در هر لایه، امکان ایجاد تراکم یکسان و یکنواخت در تمام لایه‌ها میسر خواهد بود. برخی پژوهش‌گران^[۱۹] نیز از روش تراکم مشابه روش FMRT استفاده کردند. جهت حصول اطمینان از تراکم یکنواخت بستر، چگالی هر لایه‌ی خاک در ۵ نقطه از بستر با استفاده از آزمایش مخروط ماسه^[۴۸] اندازه‌گیری شد (مجموعاً ۲۰ آزمایش). جهت پایداری چاله‌ی آزمایش مخروط ماسه، حفر چاله‌ها با عمق، شیب و دقت مناسب به‌گونه‌یی انجام شدند که دیواره‌های آن‌ها در زاویه‌ی پایدار قرار گیرند. پایداری دیواره‌های چاله به دلیل تراکم زیاد خاک و قفل و بست بین دانه‌های آن و دانه‌بندی توپُر آن (محدوده‌ی ماسه با دانه‌بندی گسترده) میسر شد. همچنین جهت اجتناب از تغییر احتمالی تراکم خاک در محل قرارگیری مدل پی مرتعش (FMRT) و نزدیکی آن و جلوگیری از تأثیر آن در نتایج آزمایش (به‌علت انجام آزمایش‌های مخروط ماسه و تراکم مجدد خاک در محل چاله‌ها)، آزمایش‌های مخروط ماسه



شکل ۱۴. تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها با کنترل بسامد تشدید.

رابطه‌ی لگاریتم کاهندگی از رابطه‌های ۸ یا ۹ به ترتیب بر حسب جابه‌جایی و سرعت قائم پی برای n نوسان متوالی محاسبه می‌شود. به منظور تخمین دامنه‌ی کرنش برشی دینامیکی بر اساس مطالعات پیشین^[۱۴] از رابطه‌ی ۱۰ استفاده می‌شود.

$$f = \frac{n}{t_{n+1} - t_n} \quad (7)$$

$$\ln\left(\frac{Z_{n+1}}{Z_n}\right) = \frac{\gamma \pi n D}{\sqrt{\lambda - D^2}} \quad (8)$$

$$\ln\left(\frac{V_{n+1}}{V_n}\right) = \frac{\gamma \pi n D}{\sqrt{\lambda - D^2}} \quad (9)$$

$$\gamma_{res} = \frac{Z_{res}}{B} \quad (10)$$

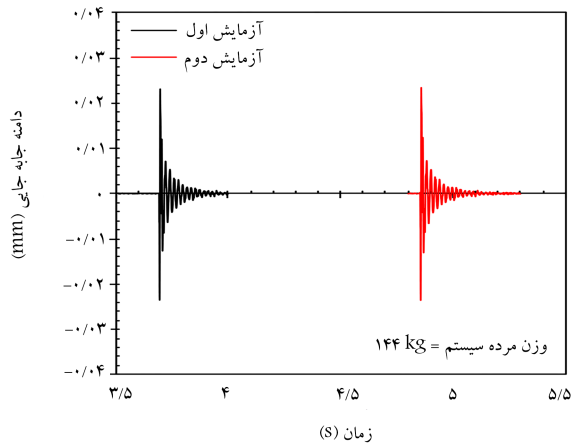
۶. تکرارپذیری و بررسی عملکرد سیستم آزمایش

به منظور بررسی صحت و تکرارپذیری نتایج حاصل از سیستم آزمایش FMRT، ۵ سری آزمایش ارتعاش پایدار به‌صورت پیوسته انجام شد. مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که ۵ الی ۱۰ بار تکرار هر سری آزمایش، تغییر محسوسی در بسامد تشدید سیستم ایجاد نکرده است. همچنین با ۵ بار تکرار سری اول آزمایش‌ها (مجموعاً حدود ۵۰ بار تکرار)، بسامد تشدید مشابه‌یی با سری اول آزمایش‌ها مشاهده شد. از آن‌جا که هرگونه تغییر در سختی بستر می‌تواند موجب تغییر بسامد تشدید شود، این مشاهده از یک سو، بیانگر عدم وقوع تغییرشکل خمیری و تغییر سختی بستر از یک آزمایش به آزمایش دیگر و از سوی دیگر، بیانگر تکرارپذیری بسیار خوب سیستم آزمایش FMRT است.

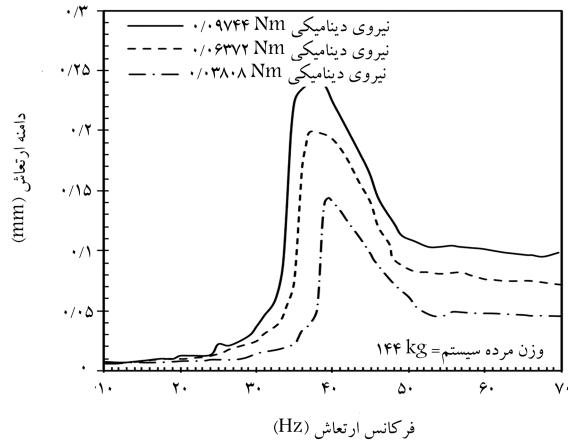
۷. نتایج نمونه از آزمایش‌های پاسخ دینامیکی مدل پی

مرتعش

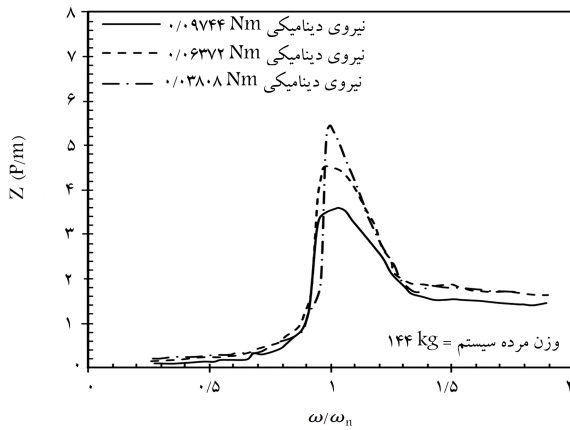
به منظور درک بهتر عملکرد دستگاه تعیین پاسخ دینامیکی، نمونه‌یی از نتایج آزمایش‌های ارتعاش آزاد و پایدار و همبستگی نتایج آن‌ها ارائه شده است. آزمایش‌های مذکور (آزمایش FMRT) روی بستر حاوی خاک با توزیع اندازه‌ی ذرات مطابق شکل ۱۳ انجام شده است. خاک ذکر شده مطابق سیستم طبقه‌بندی ۱۱ - ASTM D2۴۸۷^[۴۵]، ماسه با دانه‌بندی خوب (SW) طبقه‌بندی شده است. توده‌ی ویژه‌ی خاک آزمایش



الف) آزمایش ارتعاش آزاد؛



ب) ارتعاش پایدار؛



ج) تغییرات نسبت $(Z/(P/m))$ در مقابل بسامد زاویه‌یی نرمال شده برای آزمایش ارتعاش پایدار.

شکل ۱۴. نمونه‌یی از نتایج آزمایش‌های ارتعاش و پایدار.

همبستگی نتایج آزمایش‌های ارتعاش آزاد و پایدار شامل تغییرات مدول برشی معادل دینامیکی و نسبت میرایی معادل دینامیکی با دامنه‌ی کرنش برشی معادل دینامیکی (شکل ۱۵) نشان می‌دهند که با افزایش تراز کرنش برشی دینامیکی تقریبی، مدول برشی دینامیکی کاهش و نسبت میرایی کل افزایش یافته است. نتیجه‌ی مشابه در این خصوص، توسط برخی پژوهش‌گران، [۵۰؛ ۴۹؛ ۴۴] نیز با انجام

در فواصل دور از محل استقرار مدل پی انجام شدند. علاوه بر این، با توجه به این‌که بسامد تشدید و سختی خاک با تراکم آن مرتبط است، برای اطمینان از یکنواختی تراکم لایه‌های بستر، بسامد تشدید هر لایه‌ی خاک نیز با استفاده از سیستم آزمایش FMRT اندازه‌گیری شد. اختلاف ناچیز مقادیر مذکور مبین تراکم تقریباً یکنواخت لایه‌های خاک در عمق و سطح بستر است.

همان‌طور که پیش‌تر در توضیح ساختار دستگاه آزمایش FMRT گفته شد، از یک حسگر ژئوفون و یک حسگر شتاب‌سنج (شاهد) در مرکز پی به منظور اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی قائم پی استفاده می‌شود. در شکل ۱۴ - الف، نمونه‌ی نتایج دو آزمایش ارتعاش آزاد و در شکل ۱۴ - ب، تغییرات دامنه‌ی جابه‌جایی قائم در برابر بسامد ارتعاش را برای ارتعاش پایدار مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش نیروی دینامیکی در آزمایش ارتعاش پایدار، دامنه‌ی جابه‌جایی در حالت تشدید سیستم مرتعش افزایش و بسامد تشدید آن کاهش یافته است. [۱۸-۲۳، ۲۲، ۲۹] علاوه بر این، در شکل ۱۴ - ج نمودار نرمال شده‌ی پاسخ دینامیکی به صورت نسبت $Z/(P/m)$ در مقابل نسبت بسامد زاویه‌یی (ω/ω_n) مشاهده می‌شود. مقدار Z دامنه‌ی جابه‌جایی، P ثابت نیروی دینامیکی برابر $4m_e$ و m وزن سیستم مرتعش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شرایط وقوع تشدید $(\omega/\omega_n = 1)$ ، میزان دامنه‌ی نمودار نرمال شده‌ی پاسخ دینامیکی به بیشینه‌ی خود رسیده و با تغییر نسبت بسامد زاویه‌یی (کم یا زیاد شدن)، میزان آن کاهش یافته است. افزایش نیروی دینامیکی موجب افزایش کرنش برشی و اتلاف انرژی بیشتری شده و در نتیجه‌ی آن، میرایی افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۴ - ج، با افزایش ثابت نیروی دینامیکی، مقدار نرمال شده‌ی پاسخ دینامیکی در شرایط وقوع تشدید و حتی مقادیر نسبت بسامد زاویه‌یی بزرگ‌تر از ۱ کاهش یافته‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، آزمایش ارتعاش آزاد نیز با اعمال چندین ضربه‌ی متوالی به مرکز سیستم آزمایش و برداشت پاسخ انجام شد. در شکل ۱۴ - الف، دو پاسخ ارتعاش قائم مدل پی حاصل از ارتعاش آزاد مشاهده می‌شود.

با استفاده از مقادیر دامنه‌ی جابه‌جایی و بسامد تشدید در آزمایش ارتعاش پایدار و با استفاده از مقادیر دامنه‌های ارتعاش آزاد برای n ارتعاش متوالی با دوره‌ی تناوب ارتعاش آزاد T ، مطابق آنچه که در بخش ۳ ارائه شد، مدول برشی دینامیکی معادل، نسبت میرایی معادل و کرنش برشی دینامیکی معادل مطابق شکل ۱۵ برآورد می‌شوند، که الزاماً و کاملاً منطبق بر مقدار مدول برشی دینامیکی، نسبت میرایی و کرنش برشی دینامیکی حاصل از آزمایش‌های دقیق آزمایشگاهی نیستند؛ اما برخلاف آزمایش‌های آزمایشگاهی، نظیر ستون تشدید و آزمایش‌های صحرایی درون گمانه‌یی، سیستم آزمایش FMRT خصوصیات دینامیکی معادل بستر را بر اساس معادلات حرکت پی سیستم مرتعش و مشابه نظریه‌ی استفاده شده در طراحی پی ماشین‌آلات برآورد می‌سازد. از این رو مقادیر خصوصیات دینامیکی معادل برآورد شده، کاملاً منطبق بر پارامترهای مدول برشی، نسبت میرایی و دامنه‌ی کرنش برشی مورد نیاز در طراحی پی ماشین‌آلات است. با توجه به استقرار مدل پی مرتعش روی بستر، مقادیر مدول برشی و ضریب میرایی حاصل از آزمایش FMRT تحت تأثیر توده‌ی خاک زیر پی هستند. طبق مطالعات انجام شده توسط نویسندگان نوشتار حاضر (با توجه به تمرکز نوشتار حاضر بر طراحی و ساخت سیستم، نتایج آن در نوشتار حاضر ارائه نشده است)، برای آزمایش بارگذاری مدل پی مرتعش، ضخامت مؤثر خاک در زیر پی حدود $1/5 \times 5$ برابر بعد مدل پی بوده است. لذا با توجه به بعد مدل پی مربع برابر 400 میلی‌متر، مقادیر مدول برشی و ضریب میرایی حاصل در کرنش‌های برشی مختلف مربوط به توده‌ی بستر خاکی در محدوده‌ی زیر پی تا عمق حدود 630 میلی‌متر هستند.

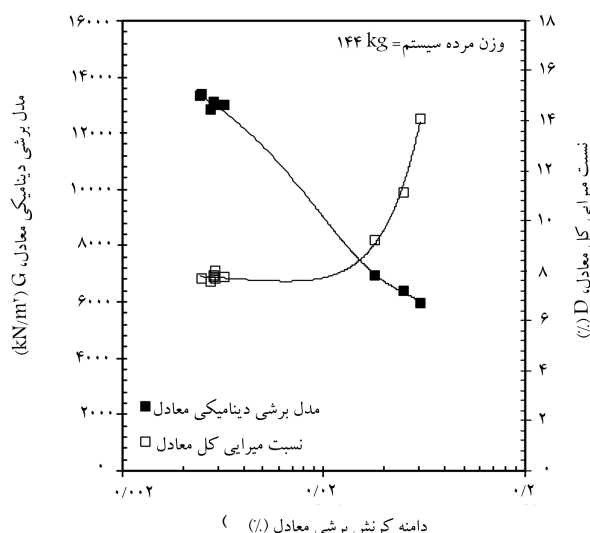
افقی خالص، مایل خالص و ارتعاش هارمونیک ناشی از یک جرم دوار (چرخش فقط یک شفت) را ایجاد کند. همچنین امکان تغییر زاویه‌ی نیروی دینامیکی و ایجاد نسبت‌های مختلفی از سه مود هم‌زمان ارتعاش (هارمونیک سینوسی قائم خالص، مایل خالص، و دورانی) نیز وجود دارد. علاوه بر این، امکان ایجاد توزیع دلخواه تنش ناشی از نیروی دینامیکی روی بستر (توزیع ثابت و خطی) میسر است؛

۳. حسگرها در سیستم آزمایش FMRT در جداره‌ها، مرکز پی و زیر پی (روی بستر) قرار دارند. از این رو، علاوه بر تعیین پاسخ دینامیکی قائم مرکز پی (که مستقل از سایر مودهای ارتعاش است)، پاسخ دینامیکی افقی و قائم در جداره‌های پی نیز به صورت هم‌زمان قابل اندازه‌گیری است و می‌توان رفتار پی تحت ارتعاش گهواره‌پی و پیچشی را نیز مطالعه کرد. همچنین دستگاه FMRT، امکان مطالعه‌ی هم‌زمان پاسخ دینامیکی پی مرتعش و بستر آن را نیز فراهم می‌کند. از این رو می‌توان اختلاف پاسخ و جدایی پی از بستر را طی فرایند آزمایش کنترل کرد و نیازی به افزایش بی‌دلیل وزن استاتیکی سیستم مرتعش نیست؛

۴. در سیستم آزمایش FMRT، بسامد ارتعاش با محاسبه‌ی هم‌زمان FFT تمامی داده‌های حسگرهای موجود دقیقاً قابل اندازه‌گیری است. همچنین خطای آزمایش شامل سایر مودهای ناخواسته‌ی ارتعاش و میزان تأثیرگذاری آن‌ها نیز با تحلیل هم‌زمان FFT داده‌های تمامی حسگرها اندازه‌گیری می‌شود؛

۵. نتایج آزمایش‌های نمونه نشان می‌دهد که آزمایش FMRT، تکرارپذیری بسیار خوبی در تعیین پاسخ دینامیکی پی و بستر دارد. لذا از سیستم آزمایش FMRT می‌توان به‌عنوان ابزار مناسب و قابل اعتمادی جهت تعیین خصوصیات دینامیکی بستر و طراحی پی ماشین‌آلات استفاده کرد؛

۶. اگرچه با تغییر ابعاد پی، امکان تغییر پارامترهای دینامیکی بستر حاصل از آزمایش روی مدل پی به ابعاد 400×400 میلی‌متر وجود دارد، اما مکانیزم و رفتار کلی بستر تحت بارهای دینامیکی نظیر بارهای وارد بر پی ماشین‌آلات یکسان خواهد بود. با توجه به امکان افزایش میزان بار مرده‌ی وارد بر مدل پی و تولید مقادیر بیشتر از بار دینامیکی در سیستم آزمایش موردنظر، امکان افزایش ابعاد پی به 750×750 متر یا حتی 1×1 متر وجود دارد. از آن‌جا که ابعاد مذکور پی منطبق بر ابعاد پیشنهادی برای آزمایش استاندارد بلوک تشدید^[۱۶] است، لذا برای تعمیم نتایج، امکان استفاده از قواعد اشاره شده در استاندارد مذکور وجود دارد. علاوه بر این، مطابق مطالعه‌ی سیه و مائو^[۵۱]، روی خاک‌ها با اندازه‌های مختلف ذرات و صفحات بارگذاری با ابعاد مختلف، کمیته‌ی بُعد صفحه‌ی بارگذاری ۱۵ برابر اندازه‌ی متوسط دانه‌های خاک (D_{50}) توصیه شده است. با توجه به بُعد مدل پی برابر 400 میلی‌متر و اندازه‌ی متوسط دانه‌های خاک (D_{50}) برابر $4/2$ میلی‌متر در نوشتار حاضر، نسبت مورد نظر بسیار بیشتر از ۱۵ است. لذا بر اساس توصیه‌ی پژوهش‌گران مذکور، اثر مقیاس از این جنبه رعایت شده است. در مجموع با توجه به این‌که هدف اصلی نوشتار حاضر عمدتاً طراحی و ساخت دستگاه تعیین پاسخ دینامیکی پی و بستر است، لذا می‌توان در مطالعات آتی با انجام آزمایش‌های متعدد روی مدل پی با عرض‌های مختلف (تا حدود ۱ متر) به بررسی تأثیر بُعد پی و نحوه‌ی تعمیم نتایج و پارامترهای دینامیکی بستر پرداخت. در مجموع از نتایج آزمایش (پارامترهای دینامیکی بستر) حاصل از دستگاه مورد نظر روی پی‌های با ابعاد در محدوده‌ی مطالعه شده در نوشتار حاضر می‌توان: ۱. جهت صحت‌سنجی و بررسی نتایج مدل‌های عددی روی پی با ابعاد بزرگ‌تر و واقعی استفاده کرد، ۲. با در نظر گرفتن اثر



شکل ۱۵. تغییرات مدول برشی دینامیکی معادل و نسبت میرایی کل معادل بستر در مقابل تغییرات کرنش برشی دینامیکی تقریبی بستر.

آزمایش‌های کوچک مقیاس سه‌محوری سیکالی گزارش شده است. نمودار مذکور (شکل ۱۵) در طراحی پی ماشین‌آلات کاربرد زیادی دارد، زیرا علاوه بر دقت و نحوه‌ی محاسبه آن، بدون دست‌خوردگی بستر و با نظریه‌ی منطبق بر نظریه‌ی طراحی پی ماشین‌آلات، مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی را نیز در دامنه‌ی وسیعی از کرنش‌های برشی دینامیکی ارائه کرده است. بنابراین با توجه به پی ماشین‌آلات، هدف طراحی و حدود مجاز جابه‌جایی آن می‌توان مقدار مناسب خصوصیات دینامیکی خاک را جهت طراحی استفاده کرد. همچنین با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای عددی می‌توان با فرض غیرخطی خصوصیات دینامیکی خاک، ارزیابی دقیق‌تری از پاسخ دینامیکی پی ماشین موردنظر داشت.

۸. خلاصه و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی رفتار و طراحی پی ماشین‌آلات نیازمند انجام آزمایش مناسب به منظور تعیین خصوصیات دینامیکی بستر است. با توجه به استفاده از نظریه‌ی جرم - میراگر و معادلات دیفرانسیل حرکت پی در طراحی پی یک ماشین، تخمین خصوصیات دینامیکی بستر با استفاده از آزمایش مشابه می‌تواند ضمن افزایش دقت محاسبات، طراحی آن را بهینه سازد. در نوشتار حاضر، با الگو از برخی مطالعات پیشین^[۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲] ضمن افزودن قابلیت‌های جدید، دقت دستگاه افزایش یافته و به منظور مطالعه‌ی هم‌زمان پارامترهای مورد نیاز و کنترل و کاهش خطای اندازه‌گیری از حسگرهای متنوع و دقیقی در قالب سیستم آزمایش FMRT استفاده شده است. تا امکان اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی یک پی مرتعش و خصوصیات دینامیکی بستر میسر شود. مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم آزمایش FMRT به این شرح است:

۱. در سیستم آزمایش FMRT، وزن استاتیکی با استفاده از بلوک‌های بتنی تأمین می‌شود. بلوک‌های بتنی با یکدیگر اصطکاک خوبی دارند و با استفاده از سیستم یک‌پارچه و هم‌مرکزکننده‌ی داخلی در زمان آزمایش، ارتعاش ناخواسته‌ی بسیار کمی ایجاد می‌کنند؛
۲. سیستم آزمایش FMRT می‌تواند ارتعاش هارمونیک سینوسی قائم خالص،

مقیاس نتایج حاصل برای پی با ابعاد مورد آزمایش را برای پی با ابعاد بزرگتر تعمیم داد.

\dot{z} : شتاب؛
 Z_{res} : دامنه‌ی جابه‌جایی در حالت تشدید؛
 γ_{res} : کرنش برشی در حالت تشدید؛
 γ : کرنش برشی؛
 C : ضریب میرایی معادل بستر؛
 D : نسبت میرایی معادل بستر؛
 f_{res} : بسامد تشدید؛
 f_n : بسامد طبیعی؛
 ω_n : بسامد زاویه‌ی طبیعی؛
 $F(t)$: نیروی دینامیکی؛
 ν : نسبت پواسون؛
 r_0 : شعاع پی دایره‌ی معادل؛
 n : تعداد نوسان متوالی؛
 B : عرض پی.

پارامترهای استفاده شده

K : سختی معادل بستر؛
 G : مدول برشی معادل بستر؛
 M : جرم معادل سیستم؛
 m_e : جرم خروج از مرکز؛
 e : خروج از مرکزیت؛
 ω : بسامد زاویه‌ی پی؛
 t : زمان؛
 z : جابه‌جایی؛
 \dot{z} : سرعت؛

پانوشته‌ها

1. DEGEBO
2. mass-spring-dashpot
3. Reissner
4. Lamb
5. boussinesq
6. Lysmer
7. steady-state
8. Zheng
9. baidya & rathi
10. kirar & krishana
11. Mandal
12. Ujjawal
13. foundation model response test
14. transmissibility
15. fast fourier transform

- neering (4th Reprint)", Ann Arbor: The University of Michigan Press (1955).
6. Terzaghi, K. "Evaluation of coefficient of subgrade reaction", Geotechnique, Institution of Civil Engineers (1955).
7. Reissner, E. "Axisymmetric stationary vibration of a circular plate on an isotropic elastic half-space subjected to a harmonically variable mass load", *Ing. Arch.*, **7**, pp. 838-849 (1936).
8. Lamb, H. "On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Containing papers of a mathematical or physical character*, **203**, pp. 1-42 (1904).
9. Chowdhury, I. and Dasgupta, S.P. "Dynamics of structure and foundation-a unified approach: 1. fundamentals", CRC Press (2008).
10. Gong, W.H., Xie, H.Y. and Wang, Y.-H. "Semi-analytical and semi-numerical method for dynamic analysis of foundation", *Applied Mathematics and Mechanics*, **27**, pp. 607-615 (2006).
11. Mbawala, S., Heymann, G., Roth, C. and et al. "The effect of embedment on a foundation subjected to vertical vibration-a field study", *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, **59**(4), pp. 26-33 (2017).
12. Lysmer, J. "Vertical Motion of Rigid Footings", University of Michigan (1965).
13. Aghaei Araei, A., Ahmadi, S., Mehrnahad, H. and et al. "Remolding effect on dynamic behavior of sandy soil samples using resonant column tests", *Sharif Civil Engineering*, **36**(3), pp. 159-169 (2020).
14. Prakash, S. and Puri, V.K. "Dynamic properties of soils from in-situ tests", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, **107**, pp. 943-963 (1981).

منابع (References)

1. Richart, F.E., Woods, R.D. and Hall, J.R., *Vibrations of Soils and Foundations*, Englewood, Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc (1970).
2. Mbawala, S. "Behaviour of machine foundations subjected to vertical dynamic loading", Doctor of Philosophy, University of Pretoria (2015).
3. Crockett, J. and Hammond, R. "The dynamic principles of machine foundations and ground", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **160**(1), pp. 512-531 (1949).
4. Barkan, D., *Dynamics of Bases and Foundation*, McGraw Hill Inc., New York (1962).
5. Hetenyi, M. "Beams on elastic foundation: theory with applications in the fields of civil and mechanical engi-

15. Gazetas, G. and Stokoe, K.H. "Free vibration of embedded foundations: theory versus experiment", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(9), pp. 1382-1401 (1991).
16. IS-5249. "Determination of dynamic properties of soil-method of test", Indian Standard (1992).
17. Baidya, D. and Krishna, G.M. "Investigation of resonant frequency and amplitude of vibrating footing resting on a layered soil system", *Geotechnical Testing Journal*, **24**(4), pp. 409-417 (2001).
18. Baidya, D. and Muralikrishna, G. "Natural frequency of vibrating foundations on layered soil system-an experimental investigation", *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, **2**, pp. 1-6 (2001).
19. Baidya, D. and Rathi, A. "Dynamic response of footings resting on a sand layer of finite thickness", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(6), pp. 651-655 (2004).
20. Mandal, A. and Baidya, D. "Effect of presence of rigid base within the soil on the dynamic response of rigid surface foundation", *Geotechnical Testing Journal*, **27**(5), pp. 475-482 (2004).
21. Pradhan, P., Baidya, D. and Ghosh, D. "Dynamic response of foundations resting on layered soil by cone model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(6) pp. 425-434 (2004).
22. Baidya, D. and Mandal, A. "Dynamic response of footing resting on a layered soil system", *West Indian Journal of Engineering*, **28**, pp. 65-79 (2006).
23. Baidya, D., Muralikrishna, G. and Pradhan, P. "Investigation of foundation vibrations resting on a layered soil system", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(1), pp. 116-231 (2006).
24. Kumar, J. and Reddy, C.O. "Dynamic response of footing and machine with spring mounting base", *Geotechnical & Geological Engineering*, **24**, pp. 15-27 (2006).
25. Öztürk, T. and Öztürk, Z. "Vibration absorption and isolation in dynamically loaded foundations", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* (Oct, 2008).
26. Kumar, J. and Boora, V. "Dynamic response of a machine foundation in combination with spring mounting base and rubber pad", *Geotechnical and Geological Engineering*, **27**, pp. 379-389 (2009).
27. Ramesh, H., Kumar, M.P., Rao, M.R. and et al. "Influence of rigid base on damping of finite sand stratum", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **162**(8), pp. 335-346 (2009).
28. Makovička, D. and Makovička, D. "The Use of rubber vibro-Base isolation to decrease structure dynamic response", *18th International Conference on Engineering Mechanics* (2012).
29. Mandal, A., Baidya, D. and Roy, D. "Dynamic response of the foundations resting on a two-layered soil underlain by a rigid layer", *Geotechnical and Geological Engineering*, **30**, pp. 775-786 (2012).
30. Ramesh, H. and Prathap Kumar, M. "Stiffness of finite sand stratum under vertical vibrations", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **166**(3), pp. 299-309 (2013).
31. Saikia, A. and Das, U.K. "Analysis and design of open trench barriers in screening steady-state surface vibrations", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **13**, pp. 545-554 (2014).
32. Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F. and Rubio-Gómez, M.C. "Viability of using end-of-life tire pads as under sleeper pads in railway", *Construction and Building Materials*, **64**, pp. 150-156 (2014).
33. Swar, S., Pradhan, P. and Mishra, B. "Parametric investigation of foundation on layered soil under vertical vibration", *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, **4**(7), pp. 13-22 (2014).
34. Gao, G., Li, N. and Gu, X. "Field experiment and numerical study on active vibration isolation by horizontal blocks in layered ground under vertical loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **69**, pp. 251-261 (2015).
35. Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F. and Rubio-Gómez, M.C. "The use of elastic elements in railway tracks: a state of the art review", *Construction and Building Materials*, **75**, pp. 293-305 (2015).
36. Sol-Sánchez, M.I., Thom, N., Moreno-Navarro, F. and et al. "A study into the use of crumb rubber in railway ballast", *Construction and Building Materials*, **75**, pp. 19-24 (2015).
37. Kirar, B., Krishana, A.M. and Rangwala, H.M. "Dynamic properties of soils for the design of machine foundations", *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, IIT Madras, Chennai, India* (2016).
38. Ulgen, D., Ertugrul, O. and Ozkan, M. "Measurement of ground borne vibrations for foundation design and vibration isolation of a high-precision instrument", *Measurement*, **93**, pp. 385-396 (2016).
39. Sitharam, T.G., *Advanced Foundation Engineering*, Taylor & Francis (2018).
40. Venkateswarlu, H., Ujjawal, K. and Hegde, A. "Laboratory and numerical investigation of machine foundations reinforced with geogrids and geocells", *Geotextiles and Geomembranes*, **46**(6), pp. 882-896 (2018).
41. Sharifi, M., Meftahi, M. and Naeni, S.A. "Influence of waste tire chips on steady state behavior of sand", *Journal of Engineering Geology*, **12**(5), pp. 189-212 (2018).
42. Ujjawal, K., Venkateswarlu, H. and Hegde, A. "Vibration isolation using 3d cellular confinement system: a numerical investigation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **119**, pp. 220-234 (2019).
43. Sheng, X.W., Zheng, W.Q., Zhu, Z.H. and et al. "Properties of rubber under-ballast mat used as ballastless track isolation layer in high-speed railway", *Construction and Building Materials*, **240**, p. 117822 (2020).
44. Prakash, S., *Soil Dynamics*, McGraw-Hill Companies (1981).
45. ASTM-D2487-17. "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International (2017).
46. ASTM-D854-14. "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", ASTM International (2014).

47. ASTM-D698-12e2. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", ASTM International (2012).
48. ASTM-D1556. "Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method", ASTM International (2015).
49. Nakhaei, A., Marandi, S., Kermani, S.S. and et al. "Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **43**, pp. 1247-132 (2012).
50. Senetakis, K., Anastasiadis, A. and Ptilakis, K. "Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **33**(1), pp. 38-53 (2012).
51. Hsieh, C. and Mao, L. "A Bench-scale performance test for evaluation of the geosynthetic reinforcement effects on granular base courses", *Geosynthetics Research and Development in Progress, Geo-Frontiers* pp. 1-11 (2008).