

چکیده

میز لرزان به عنوان شبیه ساز لرزه‌ای از ابزارهای مهم تحقیقاتی در آزمایشگاه‌های مهندسی زلزله و دینامیک سازه است. دستیابی به نتایج دقیق و قابل اطمینان در آزمایش‌های میز لرزان به دقت عملکرد میز در شبیه سازی ارتعاش وابسته است. پارامترهای متفاوتی بر این دقت عملکرد تأثیرگذار هستند که از جمله مهم ترین آنها می توان به اندرکنش میز با نمونه تحت آزمایش اشاره کرد. همچنین اندرکنش پی میز لرزان با خاک و عدم تطبیق پذیری عملکرد سیستم کنترلی این شبیه ساز لرزه‌ای با تغییر در شرایط آزمایش می تواند در کاستن از دقت نتایج حاصله تأثیرگذار باشد. اندرکنش پی میز لرزان با خاک می تواند باعث انتقال ارتعاشات به محیط پیرامونی و سبب اخلاص در عملکرد این محیط شود. یک راهکار مناسب برای کاستن از دامنه ارتعاشات انتقالی به محیط پیرامونی میز، جداسازی پی آن از زمین است. در این تحقیق یک مدل عددی ساده برای ارزیابی عملکرد میز لرزان و اثرات انتقال ارتعاشات از میز به محیط پیرامونی در دو حالت پی صلب و یا جداسازی شده پیشنهاد گردیده است. این مدل همچنین امکان بررسی تغییر در تقاضای عملکردی سیستم هیدرولیکی میز لرزان را در صورت جداسازی ارتعاشی پی دارا می باشد. نتایج به دست آمده از این مدل سازی نشان می دهد که استفاده از جداسازی در پی میز لرزان تقاضای جدیدی در سیستم هیدرولیکی و کنترلی میز در محدوده فرکانسی جداسازی ارتعاشی ایجاد می نماید. در ادامه مشخص شد که جداسازی پی باعث کاهش عمده در شتاب ایجاد شده بر روی زمین و به تناسب آن کاهش دامنه و محتوای فرکانسی شتاب در سازه‌های مجاور شده است.

واژگان کلیدی: میز لرزان، جداسازی پی، اندرکنش پی میز لرزان با خاک، انتقال ارتعاشات، تقاضای عملکردی میز لرزان.

بررسی اثرات جداسازی ارتعاشی پی میز لرزان بر عملکرد سیستم میز و سازه‌های مجاور آن

فرزانه نباتی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

منصور ضیایی فر (نویسنده مسئول)

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، mansour@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

عملکرد مناسب برای این وسیله آزمایشگاهی مؤثرند [۱-۳]. مقاله منتشر شده توسط ناکاشیما و همکاران [۲] در ارتباط با تجربیات حاصل شده از عملکرد بزرگ ترین میز لرزه جهان در طی ۱۵ سال بهره‌برداری از این میز نشان داده است که دقت عملکردی این ابزار به نوع آزمایش صورت گرفته، ملاحظات اولیه قبل از انجام آزمایش و توانایی سیستم کنترلی میز بسیار وابسته است. اغلب مطالعات صورت گرفته بر روی میز لرزان در جهت شناسایی و کاهش اثرات اندرکنش سازه تحت آزمایش با میز بوده است [۴].

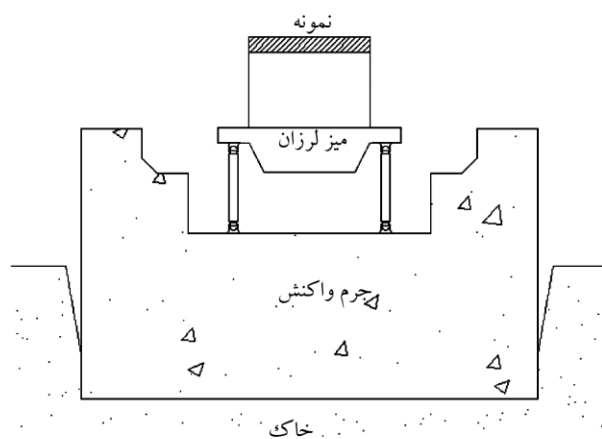
استفاده از میز لرزان^۱ امکان مطالعه رفتار دینامیکی سازه‌ها را در فضای آزمایشگاهی فراهم آورده است. صحت نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی این ابزار آزمایشگاهی به دقت عملکردی آن وابسته است. از سوی دیگر ایجاد یک محیط آرام ارتعاشی در مجاورت میز و ساختمان‌های اطراف آن از ویژگی‌های اصلی در طراحی میزهای لرزان است. عوامل متعددی همانند اندرکنش سازه تحت آزمایش^۲ با میز، عملکرد سیستم هیدرولیکی، اندرکنش خاک با پی^۳ میز لرزان و توانایی‌های سیستم کنترلی آن در ایجاد

خاک و ساختمان‌های مجاور از طریق پی میز همواره موجود است. در ارتباط با میزهای لرزه بزرگ که در محیط آزمایشگاهی و در فاصله اندکی از ساختمان‌های مجاور قرار دارند نگرانی از انتقال این ارتعاشات بیشتر است [۱۲]. مطالعه انتقال ارتعاشات از میز به محیط مجاور در قالب مطالعات اندرکنش سازه با خاک قرار دارد. این اندرکنش در کنار مواردی همچون نوع سازه تحت آزمایش و محدودیت‌های سیستم هیدرولیکی و کنترلی میز از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر نحوه عملکرد میز لرزان هستند. مطالعه اندرکنش میز با محیط اطراف بیشتر در قالب آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها با قرار دادن دستگاه لرزاننده بر روی پی و ثبت داده‌ها، ارتعاشات انتقالی به محیط مجاور و رفتار دینامیکی پی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از میان مطالعه‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه سن دیگو اشاره کرد [۱۲]. در میان تحقیقات انجام شده اثرات هم‌زمانی اندرکنش سازه و میز با اندرکنش میز با محیط اطراف کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجایی که انتقال ارتعاش^۶ از میز لرزان به محیط اطراف و ایجاد اختلال در عملکرد ساختمان‌های مجاور در برخی از میزهای لرزان موجود گزارش شده است، استفاده از جداسازی ارتعاشی به جهت کاستن از دامنه ارتعاشات انتقالی به سازه‌های مجاور بایستی مورد توجه قرار گیرد. البته استفاده از جداسازی ارتعاشی ممکن است بر عملکرد عمومی میز لرزان و سیستم‌های هیدرولیکی و کنترلی آن تأثیرگذار باشد. بدین ترتیب مطالعه عملکرد میزهای لرزان ایزوله شده نیازمند دیدگاهی مبتنی بر در نظر گرفتن اثرات متقابل سیستم‌های کنترلی و هیدرولیکی میز با سیستم جداسازی ارتعاشی آن خواهد بود [۱۳-۱۴]. راهکارهای متفاوتی برای این‌گونه مطالعات وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مطالعات تجربی ارتعاش آزاد و اجباری بر روی میز و یا مدل‌سازی عددی حرکت ارتعاشی سیستم (میز، خاک، نمونه تحت آزمایش به همراه سیستم هیدرولیکی و کنترلی میز) اشاره کرد [۱۵]. همچنین استفاده از مدل‌های عددی ساده شده نیز در

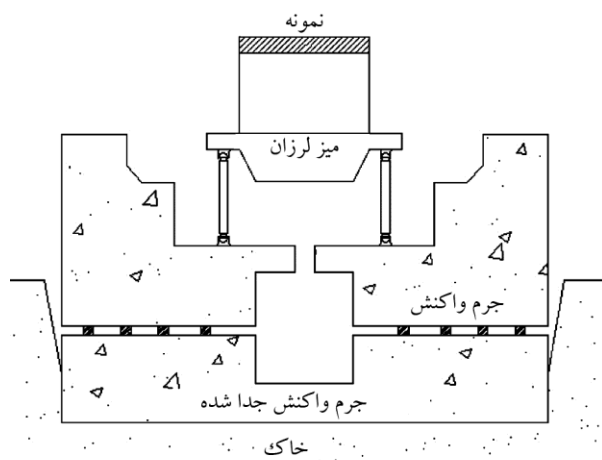
این اندرکنش ممکن است باعث ایجاد اختلال در عملکرد و تغییر در مؤلفه‌های حرکتی عرشه میز شود. برای حذف و یا کاهش این اثرات، سیستم‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری میز بایستی توانایی لازم را برای مقابله با این اثرات داشته باشند. مطالعات متعددی برای ارتقا سیستم‌های هیدرولیکی و کنترلی میز با هدف تصحیح عملکرد آنها وجود دارد. از جمله این مطالعات می‌توان به کارهای بلوندت و اسپارزا و همچنین ریناوی و همکاران اشاره کرد [۴-۵]. بر پایه این تحقیقات گزارش شده است که نسبت جرم به ارتفاع سازه تحت آزمایش بر مؤلفه‌های حرکتی عرشه میز اثرگذار بوده و موجب اختلال در حرکت عرشه میز می‌شود [۵]. در مطالعه محققان مختلف از جمله ریناوی و کلاف [۶]، کلارک [۷]، سرسا و همکاران [۸]، لومائولت و همکاران [۹]، راهکارهایی برای کاهش اثرات اندرکنش نمونه با میز از طریق تصحیح سیستم کنترلی ارائه شده است. با در نظر گرفتن اهمیت سیستم کنترلی میز لرزان در کاهش خطای عملکردی و افزایش دقت آن، مطالعات فراوانی در این حوزه انجام شده است. در این میان می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط لی و همکاران [۱۰] بر روی اندرکنش میز لرزان، سازه تحت آزمایش و نیروی بازخورد سیستم کنترلی اشاره کرد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داده است که برای افزایش دقت آزمایش‌ها نیاز است تا حلقه‌های بازخوردی و توابع انتقال مربوط به آنها به گونه‌ای در سیستم طراحی شوند تا سیستم کنترلی با بیشترین دقت ممکنه در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی سازه تحت آزمایش عمل کند. در مطالعه دیگری که توسط روتانو و همکارانش [۱۱] انجام شده است، استفاده از یک سیستم کنترلی سه‌بخشی برای کنترل میز لرزان پیشنهاد شده است. آزمایش‌های تجربی صورت گرفته بر روی میز لرزان با این سیستم کنترلی نمایانگر دقت مناسب عملکردی این نوع از سیستم کنترلی بوده است.

با توجه به بزرگی پی میزهای لرزان و سطح تماس زیاد آنها با خاک می‌توان اطمینان داشت که تکیه‌گاهی با جرم^۴ و سختی^۵ زیاد برای کاهش اندرکنش میز با خاک وجود دارد. با این وجود امکان انتقال ارتعاشات حاصل از حرکت میز لرزان به

در پایین آن طرح دیگری از پی به نمایش گذاشته شده که در آن به کمک یک لایه جداساز قسمت تحتانی پی از بخش فوقانی آن جدا شده است. در مدل‌های ارائه شده برای میز (مدل‌های جرم و فنر نشان داده شده در شکل ۲) هر جزء از سیستم میز لرزان به عنوان یک جرم مجزا با سختی و میرایی^۷ مختص به خود فرض شده‌اند و به بقیه اجزای سیستم اتصال یافته‌اند. در این مطالعه از حرکات دورانی، پیچشی و سایر درجات آزادی مرتبط با رفتارهای الاستیک و غیر الاستیک میز و یا نمونه تحت آزمایش در این مدل‌سازی صرف نظر شده و تنها یک درجه آزادی مرتبط با حرکت افقی برای هر بخش در نظر گرفته شده است. در مدل‌های ارائه شده فرض شده که عرشه میز (جرم m_2) تحت تحریک افقی ناشی از محرک F (عکس العمل جک‌های هیدرولیکی) قرار گرفته است.



الف) میز لرزان بدون جداساز ارتعاشی



ب) میز لرزان مجهز به جداساز ارتعاشی

شکل (۱): مدل میز لرزان متداول و جداسازی شده.

این خصوص می‌تواند با سرعت پردازش بالای خود به درک نحوه کارکرد این سیستم پیچیده کمک نماید. در این تحقیق مدل ساده‌ای برای میز لرزان شامل سازه تحت آزمایش به همراه عرشه و پی میز ارائه شده و از طریق آن جداسازی ارتعاشی پی و نقش آن در عملکرد میز لرزان و سیستم کنترلی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از همین مدل اثرات انتقال ارتعاشات به سازه‌های مجاور در دو حالت پی صلب و پی جداسازی شده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی میز لرزان

مدل عددی میز لرزان بایستی توانایی شبیه‌سازی اندرکنش سیستم‌های کنترلی و هیدرولیکی میز، به همراه مدل خاک اطراف پی و همچنین سازه تحت آزمایش را داشته باشد. نتایج حاصل از وجود چنین مدلی می‌تواند در رسیدن به دقت مطلوب در هنگام بهره‌برداری نهایی از میز کمک مؤثری باشد. با در نظر گرفتن بخش‌های مختلف یک میز لرزان شامل نمونه تحت آزمایش، عرشه میز، جک‌های هیدرولیکی، سیستم کنترلی و پی میز، مدل‌سازی عملکرد این تجهیزات آزمایشگاهی پیچیدگی فراوانی به دنبال خواهد داشت. با توجه به این نکته استفاده از روش‌های مبتنی بر حرکت بلوک‌های صلب اتصال یافته با عناصر الاستیک می‌تواند در کنار ساده‌سازی مدل دقت قابل قبولی را برای بررسی رفتار اندرکنشی این سیستم فراهم آورد. در این تحقیق مدل ساده‌ای از میز لرزان ارائه شده که صرف نظر از وجود هرگونه اندرکنش در سیستم، همواره قابلیت ایجاد رکورد تغییر مکانی مورد نظر بر روی عرشه میز را دارا باشد. مدل ارائه شده شامل عرشه میز لرزان، سازه تحت آزمایش و پی میز است. در این مدل‌سازی برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک با میز، از سختی و میرایی خاک متصل به پی استفاده به عمل آمده است.

شکل (۱) نمایی از دو طرح متفاوت برای پی میز لرزان که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است را نشان می‌دهد. در بالای این شکل یک پی متداول (پی یک تکه) نشان داده شده و

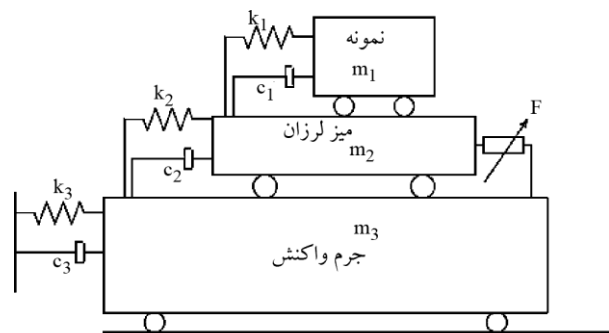
شتاب‌نگاشت زلزله به درجه آزادی دوم مدل (درجه آزادی مربوط به میز لرزان) اعمال شده است.

با توجه به نکات ذکر شده و تفاوت در تعداد درجات آزادی هر مدل، معادلات حرکت دینامیکی هر دو مدل پیشنهادی به صورت مجزا نوشته شده است. در عمل هر یک از درجات آزادی در نظر گرفته شده در این مدل‌ها (عرشه میز، سازه تحت آزمایش و پی) خود می‌توانند دارای درجات آزادی متعددی باشند. برای مثال سازه تحت آزمایش می‌تواند سازه‌ای با تعداد درجات آزادی زیاد باشد. همچنین میز لرزان می‌تواند تا شش درجه آزادی جسم صلب (سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی) داشته باشد (به غیر از درجات آزادی الاستیک، اگر دقت بالاتری مدنظر باشد). در این تحقیق به جهت ساده‌سازی برای هر جزء میز تنها یک درجه آزادی انتقالی فرض شده است. معادلات تعادل دینامیکی سیستم میز لرزان مدل‌سازی شده با سه درجه آزادی با توجه به شکل (۲-الف) به صورت زیر حاصل شده است.

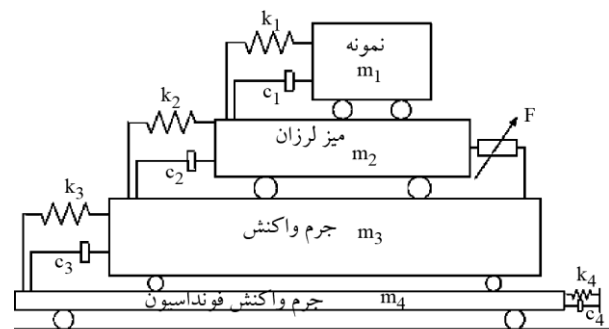
$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_2 - k_1 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - c_2 \dot{x}_3 - k_2 x_3 = F \\ m_3 \ddot{x}_3 + (c_3 + c_2) \dot{x}_3 + (k_3 + k_2) x_3 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = -F \end{cases} \quad (1)$$

در این معادلات k_1, c_1 به ترتیب ثابت میرایی و سختی نمونه روی میز همچنین k_2, c_2 پارامترهای دینامیکی برای عرشه میز لرزان و k_3, c_3 پارامترهای دینامیکی خاک هستند. معادلات تعادل دینامیکی سیستم میز لرزان با پی جداسازی شده در مدل چهار درجه آزادی نیز با توجه به شکل (۲-ب) به صورت زیر استخراج شده است.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_2 - k_1 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - c_2 \dot{x}_3 - k_2 x_3 = F \\ m_3 \ddot{x}_3 + (c_3 + c_2) \dot{x}_3 + (k_3 + k_2) x_3 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 - k_3 x_4 - c_3 \dot{x}_4 = -F \\ m_4 \ddot{x}_4 + (c_3 + c_4) \dot{x}_4 + (k_3 + k_4) x_4 - k_3 x_3 - c_3 \dot{x}_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$



شکل (الف) مدل ساده میز لرزان بدون جداساز ارتعاشی

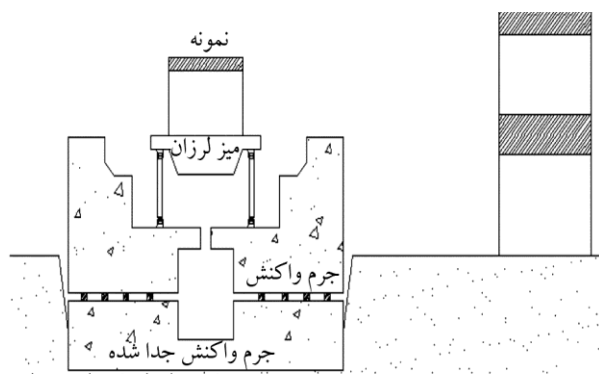


شکل (ب) مدل ساده میز لرزان مجهز به جداساز ارتعاشی

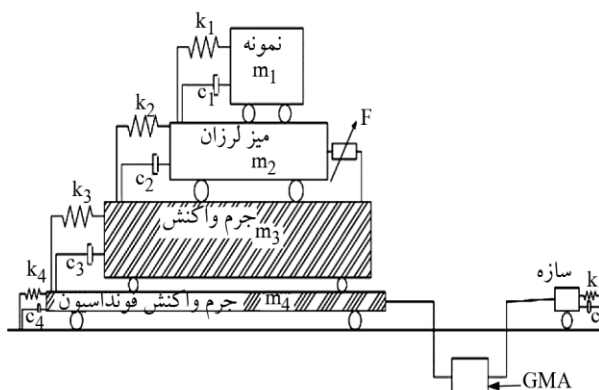
شکل (۲): مدل ساده شده میز لرزان.

بدین ترتیب همان گونه که در شکل (۲-الف) دیده می‌شود عکس‌العمل تحریک F به پی میز لرزان (جرم m_3) وارد شده و به زمین انتقال می‌یابد. در خصوص مدل ارائه شده برای میز لرزان با پی جداسازی شده^۸ (شکل ۲-ب) عکس‌العمل F پس از انتقال به بخش فوقانی پی نهایتاً به جرم m_4 در قسمت زیرین پی جداسازی شده انتقال یافته و از این طریق به زمین انتقال می‌یابد. با در نظر گرفتن مطالب ذکر شده مشخص می‌گردد که سیستم میز لرزان با پی متداول به صورت یک سیستم سه درجه و میز لرزان با پی جداسازی شده به صورت یک سیستم با چهار درجه آزاد مدل‌سازی شده است. مدل‌های ارائه شده در عین سادگی این قابلیت را دارند که رفتار اندرکنشی میز لرزه با پی و نمونه تحت آزمایش را نشان دهند. عملکرد این مدل‌ها مشابه با سازه‌های برشی سه یا چهار طبقه است که تنها با مشخص بودن جرم، سختی و میرایی هر طبقه امکان برآورد پاسخ سیستم از جمله تغییر مکان و شتاب در هر طبقه وجود دارد. شرایط مرزی حاکم بر مسئله نیز همانند سازه برشی سه یا چهار طبقه است تنها با این تفاوت که بار اعمال شده به این مدل با استفاده از

نشان‌دهنده‌ی نمای عمومی سیستم میز لرزان (با پی جداسازی شده) و سازه مجاور آن است و شکل (۳-ب) مدل ساده شده جرم و فنر آن را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل ارتعاشات ایجاد شده در درجه آزادی m_4 (قسمت جداسازی شده پی) به زمین انتقال می‌یابد و پس از آن از طریق عملگر کاهش‌دهنده ارتعاشی GMA (باید توجه داشت که این عملگر متناسب با فاصله میان سازه مجاور و میز و با توجه به نوع خاک اطراف پی متغیر است) به سازه مجاور (که در اینجا تحت عنوان درجه آزادی ۵ فرض شده است) انتقال یافته است. اگر فرض شود که پی میز صلب باشد، در این صورت درجه آزادی ۴ حذف شده و درجه آزادی ۵ از طریق GMA به درجه آزادی ۳ متصل می‌گردد. به طور معمول با گسترش جبهه امواج ارتعاشی در خاک و وجود مکانیسم میرایی تشعشعی در این محیط، افزایش فاصله از محل منبع ارتعاشی سبب کاسته شدن از دامنه ارتعاشات در محیط اطراف، خصوصاً در فرکانس‌های بالا خواهد شد.



(الف) نمای عمومی میز لرزان و سازه مجاور آن



(ب) مدل ساده شده میز لرزان جداسازی شده و سازه مجاور آن

شکل (۳): میز لرزان جداسازی شده و سازه مجاور آن.

که در آن k_4, c_4 به ترتیب ثابت میرایی و سختی قسمت تحتانی پی می‌باشند. برای حل معادلات فوق باید توجه داشت که میزان نیروی وارده به عرشه میز لرزان (درجه آزادی دوم) نامشخص است ولی تغییر مکان، سرعت و شتابی که روی عرشه میز اعمال خواهد شد معلوم بوده و بایستی برابر با تحریک ورودی باشد. برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل حاصل شده لازم است تا از یک روش گام‌به‌گام عددی استفاده شود. در این مطالعه روش به کار گرفته شده برای حل معادلات دینامیکی برآورد پاسخ مدل‌ها یکی از روش‌های حل صریح موجود (روش رانگ-کوتا^۹) بوده است. این روش به عنوان یک روش حل عددی سریع برای مسائل دینامیکی شناخته می‌شود. برای حل معادلات از این طریق ابتدا باید دستگاه‌های معادلات فوق را به فضای حالت^{۱۰} برد تا امکان استفاده از روش گفته شده میسر شود. حل دستگاه معادلات ارائه شده بر مبنای استفاده از رکورد تاریخچه تغییر مکانی معین برای عرشه میز (درجه آزادی ۲) بوده تا تغییر مکان این درجه آزادی و مشتقات زمانی آن متأثر از اندرکنش‌های سیستم میز لرزان نباشند. این بدین مفهوم است که شتاب، سرعت و تغییر مکان عرشه میز (درجه آزادی ۲) دقیقاً همان شتاب، سرعت و تغییر مکان تحریک ورودی خواهد بود. بدین ترتیب رکوردهای تغییر مکانی تحریک میز از قبل مشخص بوده ولی مقدار نیروی تحریک (F) مجهول است و بایستی در هر گام زمانی محاسبه گردد. در روش انتخابی برای حل معادلات بازه زمانی انتگرال‌گیری عددی (Δt) بر مبنای نرم خطای تعریف شده در محاسبات مشتقات به صورت خودکار در هر گام زمانی تعیین می‌شود و همواره از $\Delta t = 0.005 \text{ sec}$ کوچک‌تر است.

۳- ارائه مدل عددی برای انتقال ارتعاشات

برای بررسی اثر انتقال ارتعاشات پی میز لرزان به سازه‌های مجاور آن نیاز به گسترش مدل پیشنهادی برای میز لرزان است. برای این منظور فرض می‌شود که سازه مجاور به صورت یک سازه یک درجه آزادی مدل‌سازی شود. به این ترتیب شکل (۳-الف)

میز لرزان با پی ایزوله شده نیز مشابه فوق قابل ارائه است. این روابط به شرح زیر ارائه شده است.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_2 - k_1 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - c_2 \dot{x}_3 - k_2 x_3 = F \\ m_3 \ddot{x}_3 + (c_3 + c_2) \dot{x}_3 + (k_3 + k_2) x_3 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 - k_3 x_4 - c_3 \dot{x}_4 = -F \\ m_4 \ddot{x}_4 + (c_3 + c_4) \dot{x}_4 + (k_3 + k_4) x_4 - k_3 x_3 - c_3 \dot{x}_3 = 0 \\ m \ddot{x}_5 + c \dot{x}_5 + k x_5 = -m \ddot{x}_4 H_{GAM}(1, \omega) \end{cases} \quad (4)$$

۴- مطالعات تاریخچه زمانی بر روی مدل‌های میز لرزان

در این مقاله، مطالعه موردی بر روی میز لرزان در حال نصب پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله صورت پذیرفته است. مشخصه‌های این میز در قالب مدل‌های ۳ و ۴ درجه آزادی در جدول‌های (۱) و (۲) آمده است. مشخصه‌های مربوط به درجه آزادی مرتبط با زمین در این مدل‌ها (سختی و میرایی خاک) از طریق آزمایش‌های ارتعاش اجباری انجام گرفته بر روی پی موجود میز لرزان استخراج شده است [۱۰].

در این مدل‌ها درجه آزادی ۱ مربوط به سازه تحت آزمایش (نمونه نصب شده بر روی میز) است که سازه‌ای یک درجه آزادی با زمان تناوب $T_1 = 0.4 \text{ sec}$ و نسبت میرایی ۵ درصد فرض شده است. همچنین درجه آزادی ۲ مبین عرشه میز لرزان است که سازه‌ای بسیار نرم با زمان تناوب $T_2 = 10 \text{ sec}$ و نسبت میرایی

به این ترتیب معادلات حرکت دینامیکی سیستم برای مدل میز لرزان به همراه سازه مجاور آن در برای سیستم با پی صلب به همراه سازه مجاور آن به شرح زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_2 - k_1 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - c_2 \dot{x}_3 - k_2 x_3 = F \\ m_3 \ddot{x}_3 + (c_3 + c_2) \dot{x}_3 + (k_3 + k_2) x_3 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = -F \\ m \ddot{x}_5 + c \dot{x}_5 + k x_5 = -m \ddot{x}_3 H_{GAM}(1, \omega) \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، m معرف جرم سازه مجاور میز لرزه بوده و مقادیر c و k نیز به ترتیب سختی و میرایی این سازه را مشخص می‌کنند. همچنین x_5 معرف درجه آزادی مربوط به حرکت سازه مجاور است. در این رابطه $H_{GAM}(1, \omega)$ شتاب فیلتر شده درجه آزادی ۳ توسط تابع انتقال فرکانسی H است که مبین مکانیسم کاهش ارتعاش در خاک بر حسب فاصله l (فاصله سازه مجاور از میز لرزان) در فرکانس‌های مختلف تحریک (ω) است. بایستی توجه داشت که در این مدل‌سازی درجه آزادی سازه مجاور x_5 از درجات آزادی سیستم میز لرزان مستقل است و اندرکنشی بین آنها وجود ندارد. بنابراین پس از حل دستگاه معادلات سازه سه درجه آزادی و مشخص شدن رکورد \ddot{x}_3 امکان فیلتر کردن آن توسط تابع انتقال فرکانسی (H_{GAM}) فراهم می‌گردد و پس از آن معادله تک‌درجه آزادی سازه مجاور حل می‌شود. معادلات حرکت دینامیکی برای مدل

جدول (۱): مشخصات مدل سه درجه آزادی.

وزن (تن)	سختی (نیوتن بر میلی‌متر)	ثابت میرایی (نیوتن در ثانیه بر میلی‌متر)	نسبت میرایی (درصد)	پریود (ثانیه)
۲۰	۵۰۰۰	۳۱	۵	۰/۴
۴۰	۱۶	۲/۵	۵	۱۰
۴۳۰۰	۲×۱۰^۷	۹×۱۰^۴	۱۵	۰/۰۹

جدول (۲): مشخصات مدل چهار درجه آزادی.

وزن (تن)	سختی (نیوتن بر میلی‌متر)	ثابت میرایی (نیوتن در ثانیه بر میلی‌متر)	نسبت میرایی (درصد)	پریود (ثانیه)
۲۰	۵۰۰۰	۳۱	۵	۰/۴
۴۰	۱۶	۲/۵	۵	۱۰
۳۵۰۰	$۰/۰۶ \times ۱۰^۷$	$۰/۹ \times ۱۰^۴$	۵	۰/۵
۸۰۰	۲×۱۰^۷	$۳/۸ \times ۱۰^۴$	۱۵	۰/۰۴

جدول (۳): زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل عددی.

ردیف	نام زلزله	نام ایستگاه	بزرگا (ریشر)	فاصله تا گسل (کیلومتر)	مدت زمان (تکانه قوی ثانیه)	نام مؤلفه	بیشترین شتاب	فرکانس غالب (هرتز)
۱	امپریال ^{۱۱} ۱۹۷۹	117 El Centro Array 9	۷	۱۰	۵۰/۳۴	X	۰/۳۵ g	۰/۵۹۵
۲	فریولی ^{۱۲} ۱۹۷۶	8012 Tolmezzo	۶/۵	۳۷/۷	۱۰/۳	X	۰/۳۵ g	۲/۰۰۲
۳	مرگان هیل ^{۱۳}	57191 Halls Valley	۶/۲	۱۸	۱۰/۶۴	X	۰/۳۱ g	۱/۵۳۸
۴	نورث ریج ^{۱۴} ۱۹۹۴	24400 LA - Obregon Park	۶/۷	۳۷/۹	۱۱/۲۲	X	۰/۵۶ g	۲/۵۸۸
۵	سان فرناندو ^{۱۵}	24278 Castaic - Old Ridge Route	۶/۶	۲۴/۹	۱۴/۵۳	X	۰/۳۲ g	۲/۹۳
۶	ویتیر نروز ^{۱۶}	951 Brea Dam (Downstream)	۶	۲۳	۱۰	X	۰/۳۱ g	۴/۶۱
۷	ال سنتر و ^{۱۷} ۱۹۴۰	117 El Centro Array #9	۷	۱۵	۲۴/۱۱	X	۰/۳۱ g	۱/۴۶۵

۵ درصد (با توجه به مشخصه‌های سیستم تعلیق میز) فرض گردیده است. در ادامه مطالعه، عملکرد میز لرزان تحت تحریک شتاب‌نگاشت‌های مختلف بررسی شده است.

رکوردهای تحریک مورد استفاده از هفت زلزله تشکیل شده که به عنوان ورودی تغییر مکانی به درجه آزادی ۲ اعمال شده است. زلزله‌های انتخاب شده همگی به شتاب ثقل هم‌پایه شده‌اند تا امکان مطالعه رفتار سیستم در تحریک تاریخچه زمانی با شتاب‌نگاشت‌هایی با دامنه حداکثر شتاب ثقل بر روی میز امکان‌پذیر باشد. جدول (۳) مشخصه‌های عمومی زلزله‌های گفته شده را نشان می‌دهد. برای حل مسئله با استفاده از تغییر متغیر $\dot{x}_i = \dot{g}_{2i}$ ، $x_i = g_{2i-1}$ (در نتیجه $\ddot{x}_i = \ddot{g}_{2i}$) معادلات سیستم به فضای حالت انتقال پیدا کرده‌اند. در نهایت برای حالت پی صلب معادلات حرکت به فرم رابطه (۵) حاصل شده‌اند.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{g}_2 = \frac{(c_1 g_4 + k_1 g_3 - c_1 g_2 - k_1 g_1)}{m_1} \\ \dot{g}_4 = \frac{(F + k_1 g_1 + c_1 g_2 + k_2 g_5 + c_2 g_6 - (c_1 + c_2) g_4 - (k_1 + k_2) g_3)}{m_2} \\ \dot{g}_6 = \frac{(-F + k_2 g_3 + c_2 g_4 - (c_2 + c_3) g_6 - (k_2 + k_3) g_5)}{m_3} \\ \dot{g}_{2i-1} = g_{2i} \quad i = 1, 2, 3 \end{array} \right. \quad (5)$$

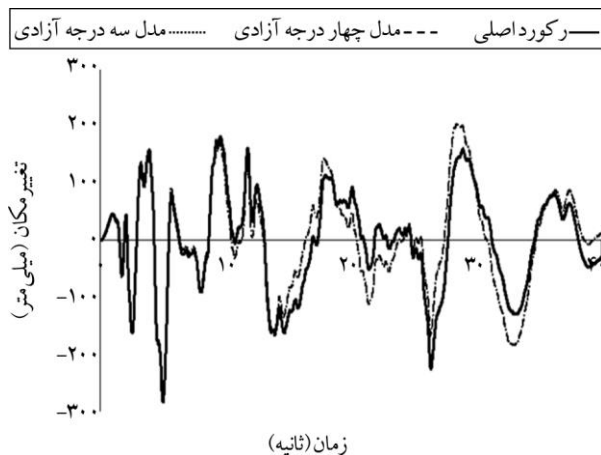
معادلات فضای حالت برای مدل پی جداسازی شده نیز به فرم

زیر به دست آمده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{g}_2 = \frac{(c_1 g_4 + k_1 g_3 - c_1 g_2 - k_1 g_1)}{m_1} \\ \dot{g}_4 = \frac{(F + k_1 g_1 + c_1 g_2 + k_2 g_5 + c_2 g_6 - (c_1 + c_2) g_4 - (k_1 + k_2) g_3)}{m_2} \\ \dot{g}_6 = \frac{(-F + k_2 g_3 + c_2 g_4 - (c_2 + c_3) g_6 - (k_2 + k_3) g_5 + k_3 g_7 + c_3 g_8)}{m_3} \\ \dot{g}_8 = \frac{(k_3 g_5 + c_3 g_6 - (c_3 + c_4) g_8 - (k_3 + k_4) g_7)}{m_4} \\ \dot{g}_{2i-1} = g_{2i} \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{array} \right. \quad (6)$$

۵- صحت‌سنجی مدل عددی

جهت ارزیابی نحوه عملکرد مدل عددی در ابتدا زلزله به عنوان ورودی شتاب به عرشه میز اعمال شده و از این طریق تاریخچه زمانی نیروی جک هیدرولیکی (F) از حل معادلات سیستم مشخص می‌گردد. پس از آن روند حل مسئله معکوس شده و نیروی حاصل شده به عنوان تحریک نیرویی به درجات آزادی ۲ و ۳ اعمال شده و تاریخچه زمانی تغییر مکان و شتاب عرشه میز محاسبه می‌گردد. این بررسی با فرض زلزله ال سنتر و انجام شده است. نتایج به دست آمده حاکی از تطبیق مناسب تاریخچه زمانی شتاب میز برای هر دو مدل ۳ و ۴ درجه آزادی بوده که در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. بر این اساس برای هر دو مدل اختلاف مشاهده شده در نتایج شتاب

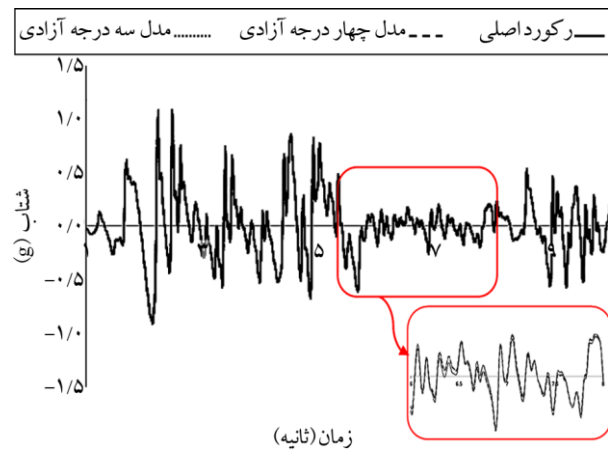


شکل (۶): مقایسه تغییر مکان درجه آزادی ۲ برای هر دو مدل ۳ و ۴ درجه آزادی با رکورد اصلی (زلزله ال سترو).

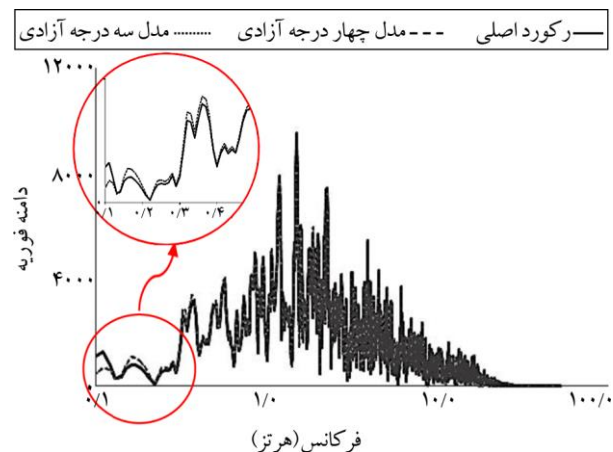
به این منظور در مرحله بعدی برای افزایش دقت حل مسئله رکورد شتاب به همراه رکورد تاریخچه زمانی تغییر مکانی آن تحریک به طور هم‌زمان به درجه آزادی مربوطه اعمال گردیده است. نتایج به دست آمده با این تصحیح در نهایت به ایجاد دقت لازم در مدل‌سازی انجامید. لازم به ذکر است که در انجام این کار رکورد شتاب و تغییر مکان پس از اعمال شرایط تصحیح خط^{۱۸} مبنا در ابتدا و پایان رکوردها به عرشه میز اعمال گردیده‌اند.

۶- تعیین تقاضای عملکردی سیستم محرک میز لرزان

همان‌طور که اشاره شد جداسازی ارتعاشی در پی می‌تواند منجر به کاهش دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاش‌های انتقالی به محیط پیرامونی میز گردد و از این طریق سطح آسایش محیط پیرامون میز در زمان بهره‌برداری افزایش یابد. اما این شیوه در عمل به سیستم تکیه‌گاهی جک‌های هیدرولیکی (درجه آزادی ۳) اجازه تغییر مکان بیشتری در مقایسه با پی صلب خواهد داد. این حرکت اضافه در سیستم تکیه‌گاهی جک‌ها می‌تواند بر عملکرد سیستم‌های هیدرولیکی و کنترلی تأثیر نامطلوب داشته باشد و موجب اختلال در عملکرد آن‌ها گردد. برای بررسی این اثرات، تغییر مکان نسبی اضافی ایجاد شده بین دو قسمت جداسازی شده (درجه آزادی ۳ و ۴) محاسبه و در شکل (۷) برای زلزله‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بیشینه

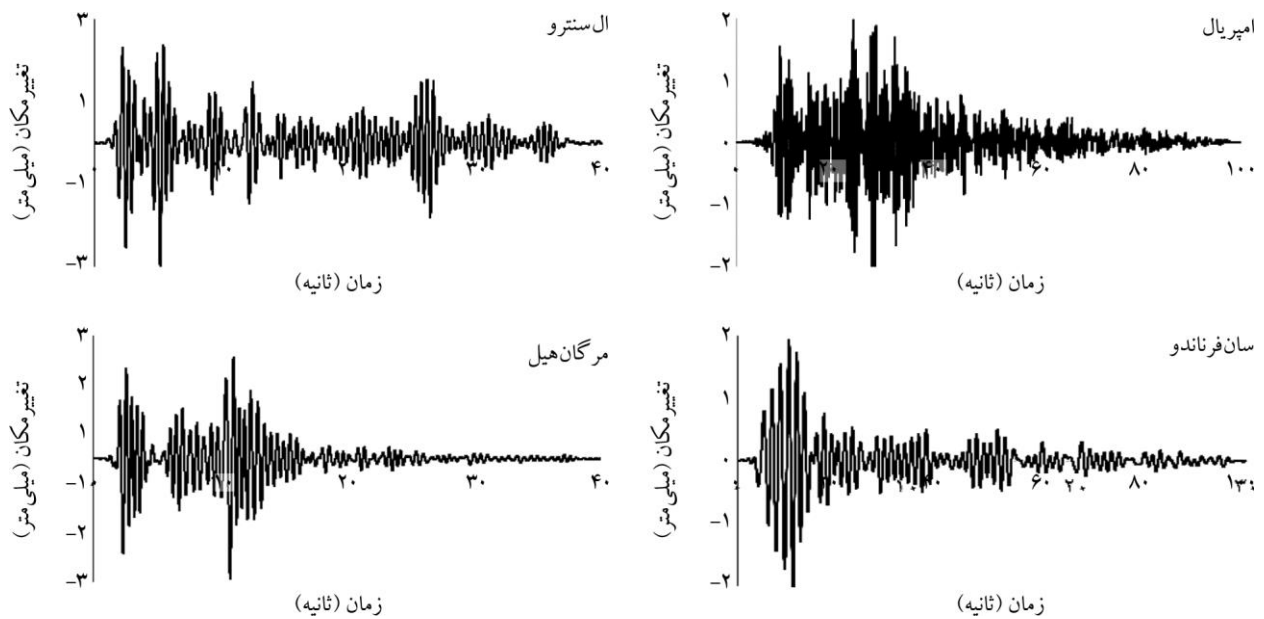


شکل (۴): مقایسه شتاب درجه آزادی ۲ برای دو مدل با رکورد اصلی (زلزله ال سترو).



شکل (۵): مقایسه محتوای فرکانسی شتاب در درجه آزادی ۲ در مدل‌های ۳ و ۴ درجه آزادی با رکورد اصلی (زلزله ال سترو).

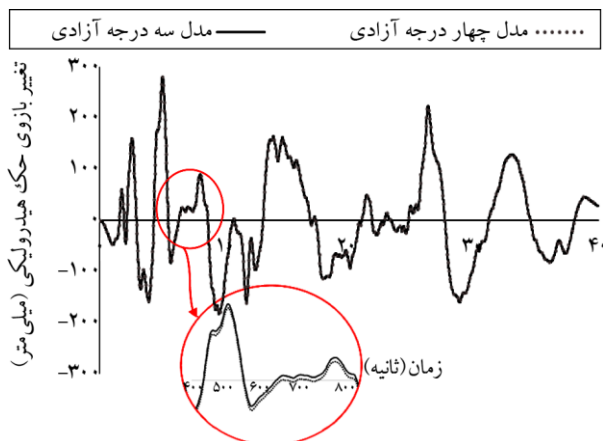
درجه آزادی ۲ در مقایسه با رکورد اصلی زلزله مقدار کمی است که بیشتر در فرکانس‌های پایین دیده شده است. چنانچه این مقایسه برای تاریخچه تغییر مکانی رکورد اصلی با تاریخچه تغییر مکان دو مدل‌ها در زمانی که سیستم تحت اثر تحریک ورودی نیروی F (به دست آمده از مرحله اول تحلیل) قرار داشته باشد صورت پذیرد، نتایج متفاوت خواهد بود. این مسئله در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نتایج تغییر مکانی با هم تطابق کمتری دارند. این عدم تطابق در نتایج به دست آمده برای تغییر مکان در درجه آزادی ۲ ناشی از آن است که در مدل‌سازی مسئله دقت لازم در اعمال تحریک تغییر مکانی به عرشه میز صورت نپذیرفته است.



شکل (۷): تغییر مکان نسبی دو قسمت جداسازی شده پی.

شکل (۸) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در عمل اختلاف عمده‌ای در مقدار جابه‌جایی دو سر جک در دو مدل دیده نمی‌شود. این مسئله مبین آن است که جداسازی ارتعاشی پی در رفتار عمومی جک‌های هیدرولیکی و تقاضای عمومی تغییر مکانی آنها چندان مؤثر نیست.

با این وجود لازم است تا افزایش تقاضا در حرکت بازوی جک‌های هیدرولیکی در حوزه فرکانسی مورد ارزیابی قرار گرفته تا مشخص شود آیا ظرفیت لازم در سیستم هیدرولیکی و کنترلی این جک‌ها برای پاسخ به تقاضای ایجاد شده کافی است یا خیر؟

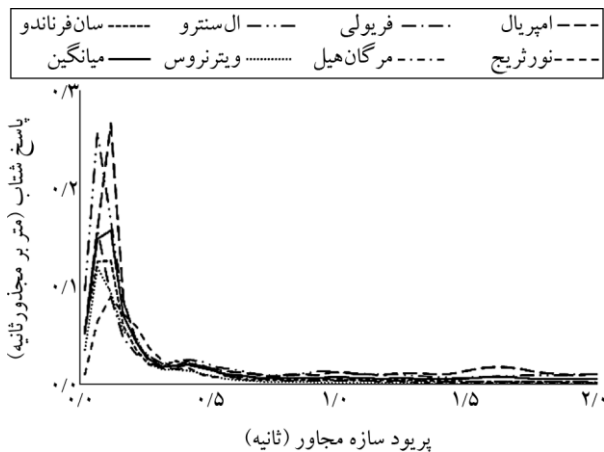


شکل (۸): جابه‌جایی بازوی جک هیدرولیکی در دو مدل پی صلب و جداسازی شده در زلزله ال سسترو.

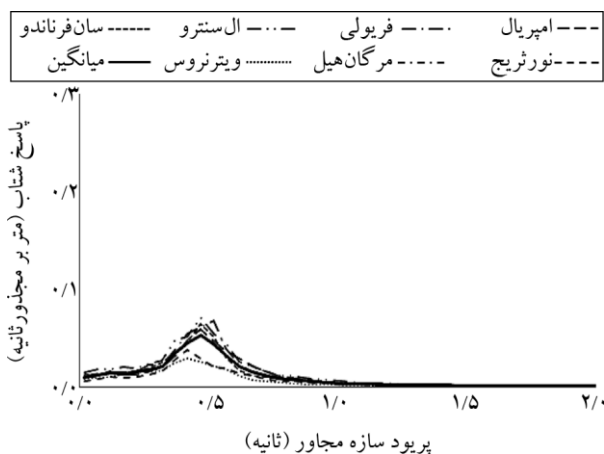
این تغییر مکان نسبی بین دو لایه جداسازی در محدوده ± 3 میلی‌متر است. این میزان بیانگر آن است که لایه جداسازی شده تنها نیازمند کمتر از ± 3 میلی‌متر تغییر مکان نسبی در مدل مورد بررسی بوده است. با توجه به آنکه شتاب اعمالی به میز (در درجه آزادی ۲) دارای بیشینه شتاب ممکن برای میز (شتاب ثقل) است، می‌توان نتیجه گرفت که تقاضای تغییر مکانی لایه جداساز در این مدل بسیار پایین است و می‌توان با کاهش سختی درجه آزادی ۳ به افزایش سطح جداسازی در پی اقدام نمود. از طرف دیگر میزان تغییر مکان نسبی ثبت شده لایه جداساز بیانگر افزایش تقاضا در حرکت بازوی جک‌های هیدرولیکی در مدل جداسازی شده نسبت به پی صلب تلقی می‌گردد. از لحاظ مقداری تغییر مکان‌های ذکر شده میزان دامنه قابل توجهی ندارد ولی بررسی محتوای فرکانسی آنها مشخص کرده است که این تغییر مکان‌های اضافی دارای محتوای فرکانسی بالایی هستند که این مورد می‌تواند نگران‌کننده باشد زیرا تغییر در تقاضای عملکردی جک‌های هیدرولیکی در فرکانس‌های بالا ممکن است خارج از ظرفیت جک‌ها و یا خارج از ظرفیت سیستم کنترلی آنها باشد.

مقایسه میزان جابه‌جایی بازوی حرکتی جک هیدرولیکی در زلزله ال سسترو برای هر دو حالت پی صلب و جداسازی شده در

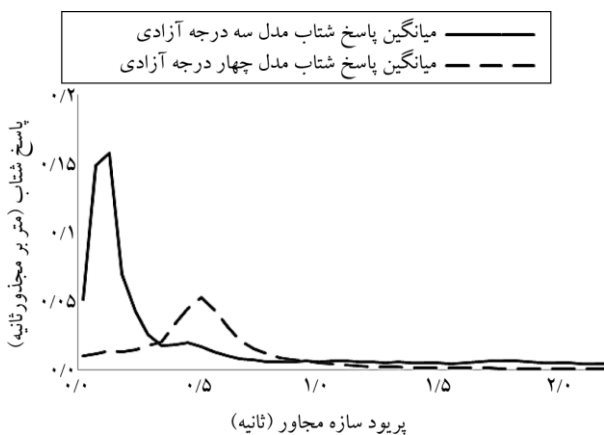
دامنه حداکثر شتاب طیفی در پی صلب در محدوده ۰/۲ تا ۰/۳ ثانیه‌ای برای سازه مجاور است. در حالی که برای پی جداسازی شده این دامنه کمتر بوده (حدود یک سوم) و در محدوده زمان تناوب‌های بزرگ تری (۰/۴ تا ۰/۶ ثانیه) قرار گرفته است.



شکل (۱۰): طیف شتاب سازه مجاور در مدل پی صلب.

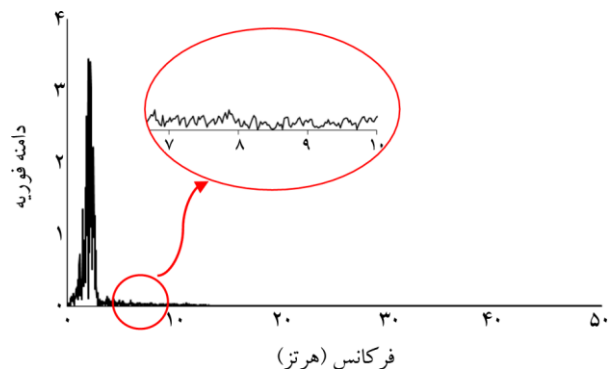


شکل (۱۱): طیف شتاب سازه مجاور در مدل پی جداسازی شده.



شکل (۱۲): مقایسه میانگین طیف شتاب سازه مجاور در دو مدل.

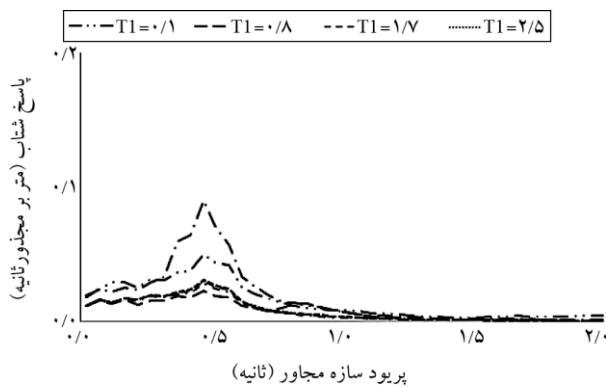
در شکل (۹) محتوای فرکانسی افزایش تقاضای حرکتی جک هیدرولیکی تحت اثر تحریک زلزله ال سنترو نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود تقاضای افزایش حرکتی در جک‌های هیدرولیکی بیشتر در محدوده فرکانسی ۲ هرتز است که در نزدیکی فرکانس غالب درجه آزادی ۳ (پی جداسازی شده) قرار دارد. این بدان معناست که جک‌های هیدرولیکی در عمل باید بتوانند افزایش تقاضای حرکتی کوچک ناشی از تغییر مکان جرم m_3 را در محدوده فرکانسی پایین تأمین نمایند. این افزایش تقاضا در عمل به علت ظرفیت فرکانسی بالای جک‌های هیدرولیکی موجود (تا محدوده ۵۰ هرتز) با تغییر در سیستم نرم‌افزاری کنترل میز لرزان قابل حصول خواهد بود.



شکل (۹): محتوای فرکانسی اختلاف تغییر مکان جک هیدرولیکی در دو مدل پی صلب و جداسازی شده در زلزله ال سنترو.

۷- بررسی ارتعاشات انتقالی به سازه‌های مجاور

پس از تحلیل مسئله و مشخص شدن رکوردهای تاریخچه زمانی در درجه آزادی تحتانی پی (\ddot{x}_3 در مدل پی صلب و \ddot{x}_4 در مدل پی جداسازی شده) این رکورد به عنوان بار محرک سازه مجاور به درجه آزادی ۵ اعمال شده است. در تحقیق حاضر محل قرارگیری سازه مجاور در فاصله بسیار نزدیک با پی میز لرزان فرض شده و از تاثیر دادن مکانیسم کاهش ارتعاش در خاک (GMA) در تحلیل‌های صورت گرفته صرف نظر شده است. اثرات انتقال ارتعاشات به سازه‌های مجاور می‌تواند به صورت طیف پاسخ شتاب برای این سازه‌ها در شکل‌های (۱۰) تا (۱۴) ارائه شده‌اند. همان گونه که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود،



شکل (۱۴): طیف شتاب سازه مجاور در مدل پی جداسازی شده و با تغییر در پررود نمونه تحت آزمایش.

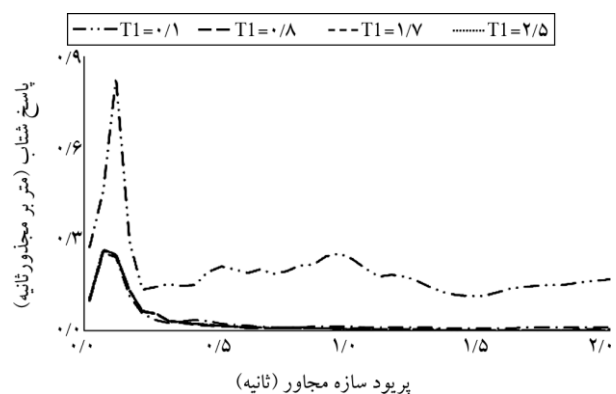
نتایج حاصل شده نشان‌دهنده‌ی اثرات قابل ملاحظه اندرکنش سازه تحت آزمایش با سیستم میز لرزان و پی آن است. لازم به ذکر است که به سبب نوع تحلیل‌های انجام گرفته در این مطالعه که با اعمال مستقیم رکوردهای تغییر مکانی بر روی عرشه میز لرزان همراه بوده است، عملاً اندرکنشی بین میز با سیستم محرک هیدرولیکی و کنترلی آن وجود نداشته است. این بدان معنی است که سیستم کنترلی و هیدرولیکی میز توانایی ایجاد تحریک خواسته شده را به تمام و کمال دارا بوده‌اند. این مسئله می‌تواند دقت و صحت نتایج به‌دست آمده را در صورت عدم ظرفیت نیرویی - تغییر مکانی در سیستم هیدرولیکی میز (و یا عدم ظرفیت انطباق‌پذیری سیستم کنترلی با تقاضای مورد نیاز برای عملکرد جک‌های هیدرولیکی) با اشکال مواجه سازد. در این میان باید توجه داشت که توانایی سیستم‌های نوین سخت‌افزاری و الگوریتم‌های کنترلی جدید در مدیریت سیستم محرک میز قابلیت‌های مناسبی را برای افزایش عملکرد میزهای لرزان ایجاد نموده و امکان افزایش ظرفیت انطباق‌پذیری سیستم‌های کنترلی را در جهت برآوردن تقاضای مورد نیاز فراهم ساخته است.

ورود ارتعاشات با فرکانس‌های بالا به خاک و انتقال آن به سازه مجاور می‌تواند بر عملکرد اجزای غیر سازه‌ای مانند شیشه‌ها، اتصالات اجزای غیر سازه‌ای و سیستم‌های تأسیساتی تأثیرگذار باشد. مقایسه شتاب ایجاد شده در روی زمین در دو حالت پی متداول و پی ایزوله‌شده (نشان داده شده در شکل ۱۵) مبین آن است که در حالت پی صلب شتاب به وجود آمده در روی زمین

در شکل (۱۲) مقایسه‌ای مابین مقادیر متوسط شتاب طیفی در هر دو حالت پی صلب و پی ایزوله ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود کاهش دامنه شتاب در پی ایزوله شده نشان‌دهنده‌ی ایجاد یک فضای آرام‌تر در اطراف میز برای سازه‌های با پررود کوتاه تا بلند است.

لازم به ذکر است که با تغییر در سختی و میرایی لایه ایزولاتور مقادیر حاصل برای شتاب طیفی در سازه مجاور به تناسب تغییر خواهد نمود. در مدل حاضر پررود درجه آزادی پی ایزوله شده m_3 در محدوده $T = 0.5 \text{ sec}$ قرار دارد و از این‌رو حداکثر شتاب طیفی سازه مجاور نیز در همین محدوده قرار گرفته است.

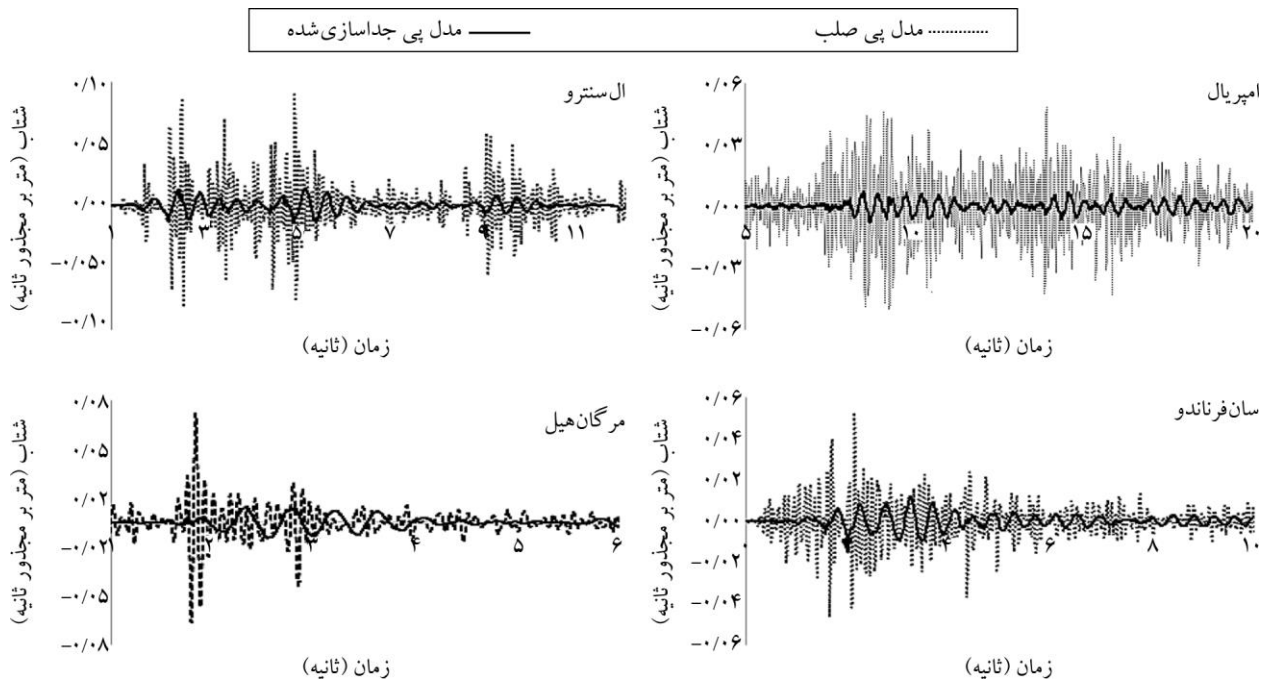
در این مطالعه همچنین مشخص شد که زمان تناوب نمونه تحت آزمایش می‌تواند بر شتاب ایجاد شده در سطح زیرین پی تأثیرگذار باشد و موجب تغییر در دامنه پاسخ سازه مجاور شود. در این تحقیق زمان تناوب نمونه واقع بر روی میز در محدوده 0.1 ثانیه تا 2.5 ثانیه تحت اثر زلزله ال‌سنترو تغییر داده شده است. در نمودارهای قبلی زمان تناوب برای سازه تحت آزمایش برابر با 0.4 ثانیه بوده است. نتایج حاصله در این ارتباط در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت هرچه سازه واقع بر روی میز سخت‌تر باشد. شتاب ایجاد شده در سازه مجاور بیشتر می‌شود. این افزایش تنها در نزدیکی زمان تناوب سازه مجاور با زمان تناوب غالب پی قابل مشاهده است.



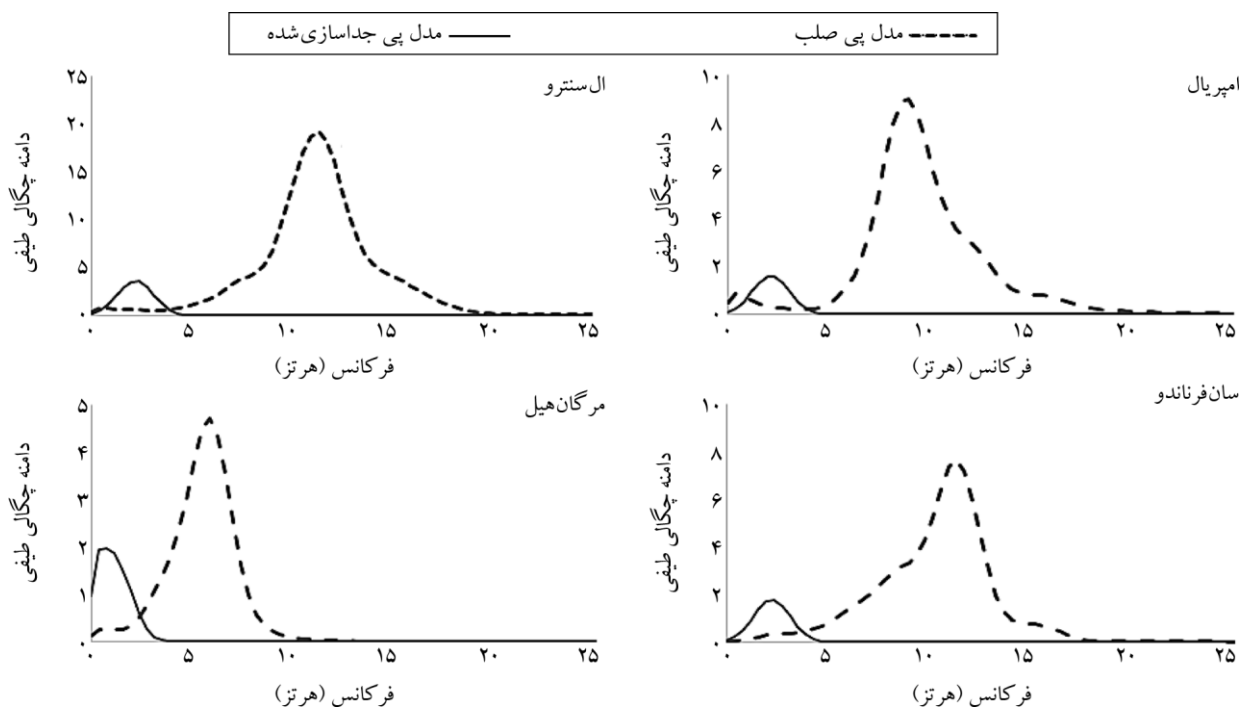
شکل (۱۳): طیف شتاب سازه مجاور در مدل پی صلب با تغییر در پررود سازه تحت آزمایش.

از میز لرزان با پی جداسازی شده در بازه پایین تری قرار دارد. بر این اساس بررسی شتاب در حوزه فرکانس مورد توجه قرار داده شده است. نتایج حاصله در این ارتباط (نشان داده شده در شکل ۱۶) مشخص می‌کند که حداکثر دامنه ارتعاشات در هر دو مدل پی صلب و پی جداسازی شده در نزدیکی فرکانس غالب پی اتفاق می‌افتد.

در اثر حرکت میز دارای دامنه بیشتر و عرض باند فرکانسی بالاتر است. به عنوان نمونه دامنه شتاب انتقال یافته به زمین با فرض زمان تناوب ۰/۴ ثانیه برای نمونه تحت آزمایش با استفاده از پی جداسازی شده تا حدود ۸۵ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که محتوای فرکانسی این شتاب نیز در هنگام استفاده



شکل (۱۵): مقایسه شتاب ایجاد شده بر روی زمین در دو مدل پی جداسازی شده و صلب.



شکل (۱۶): مقایسه شتاب انتقالی به زمین در پی صلب و جداسازی شده در حوزه فرکانس.

کاهش دامنه ارتعاشات انتقالی به پیرامون میز لرزان جداسازی ارتعاشی پی آن است. گرچه با انجام این کار دامنه ارتعاشات انتقالی به محیط اطراف کاهش می‌یابد ولی جداسازی ارتعاشی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر نحوه عملکرد میز لرزان داشته باشد. در این تحقیق اثرات جداسازی پی میز لرزان بر سیستم محرکه آن و همچنین تأثیر آن بر روی کاهش ارتعاشات ساختمان‌های مجاور میز مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این کار یک مدل عددی ساده ارائه شده و با استفاده از آن تغییر در تقاضای عملکردی سیستم هیدرولیکی میز در اثر جداسازی ارتعاشی و تغییرات در طیف شتاب سازه مجاور میز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت زیر دسته‌بندی شده است:

۱. جداسازی ارتعاشی پی باعث ایجاد تغییر مکان نسبی در محدوده ± 3 میلی‌متر بین دو لایه پی در صورت تحریک میز با شتابی معادل شتاب ثقل گردیده است. این مقدار جابه‌جایی مبین افزایش تقاضا در عملکرد بازوی حرکتی جک هیدرولیکی در مدل پی جداسازی شده نسبت به پی صلب است. این مقدار گرچه از لحاظ عددی مقدار زیادی نیست ولی می‌تواند نیاز به ظرفیت حرکتی بیشتر در فرکانس‌های بالا را برای جک‌های هیدرولیکی ایجاد نماید.
۲. افزایش تقاضای جدید در حرکت بازوی جک هیدرولیکی می‌تواند با ایجاد تغییرات مناسب در سیستم کنترلی میز لرزان در حد قابل قبول تأمین گردد.
۳. در حالتی که پی میز لرزان صلب باشد، دامنه شتاب ایجاد شده در سازه‌های مجاور زیاد خواهد بود ولی جداسازی پی باعث کاهش قابل ملاحظه در دامنه شتاب انتقال یافته به سازه‌های مجاور می‌گردد.
۴. تغییر در پررود سازه تحت آزمایش بر شتاب سازه مجاور تأثیرگذار است. بر اساس نتایج حاصل شده به کارگیری نمونه‌ها با سختی زیادتر بر روی میز لرزان می‌تواند دامنه شتاب برای سازه‌های مجاور را افزایش دهد.
۵. در صورت صلب بودن پی دامنه ارتعاشات انتقال یافته به

همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، برای پی صلب دامنه ارتعاشات غالب در فرکانس‌های ۸ تا ۱۵ هرتز قرار دارد. وجود چنین فرکانس‌هایی می‌تواند بر آرامش محیط پیرامونی و همچنین بخش‌های غیر سازه‌ای ساختمان‌های مجاور مانند شیشه‌ها تأثیرگذار باشد. با توجه به همان شکل ملاحظه می‌شود که در مدل میز لرزان جداسازی شده ارتعاشات عمدتاً در دامنه ۱ تا ۵ هرتز دارای دامنه بیشینه هستند و بعد از آن از دامنه ارتعاشات به سرعت کاسته می‌گردد. این امر نشان‌دهنده حذف ارتعاشات با محتوای فرکانسی بالا در سیستم پی میز لرزان می‌باشد. حذف ارتعاشات در فرکانس‌های بالا یکی از مزایای عمده استفاده از جداسازی پی برای سیستم میز لرزان در مجاورت با سازه‌های پیرامونی است. این مسئله در طیف شتاب سازه مجاور پی (نشان داده شده در شکل ۱۲) نیز به وضوح قابل مشاهده بوده است.

مطالعات انجام گرفته در این تحقیق با فرض درجات آزادی محدود برای اجزای میز و همچنین نمونه تحت آزمایش صورت گرفته است. برای افزایش دقت و کاربردی ساختن این تحقیق نیاز به افزایش درجات آزادی برای پی و عرشه میز (از یک درجه آزادی در هر جرم به ۶ درجه آزادی حرکت جسم صلب و همچنین درجات آزادی مودهای الاستیک در صورت نیاز) خواهد بود. همچنین درجات آزادی نمونه تحت آزمایش نیز بایستی افزایش متناسبی داشته باشد تا بررسی اثرات مودهای بالاتر سازه تحت آزمایش در نتایج به دست آمده امکان‌پذیر باشد و از این طریق امکان دستیابی به نتایج کاربردی نیز از این تحقیق فراهم گردد.

۸- نتیجه‌گیری

مطلوب‌ترین عملکرد برای میز لرزان زمانی حاصل می‌گردد که علاوه بر دقت بالا در هنگام بهره‌برداری، دامنه انتقال ارتعاشات حاصله از عملکرد میز به سازه‌های مجاور آن نیز در محدوده قابل تحمل باشد. ارتعاشات انتقالی از میز به محیط مجاور بر سطح آسایش کاربران و عملکرد اجزا غیر سازه‌ای ساختمان‌های مجاور میز تأثیرگذار است. یکی از راهکارها برای

9. Le Maout, A., Queval, J.C., and Bairrao, R. (2010) Dynamic interaction between the shaking table and the specimen during seismic tests. *Advances in Performance-Based Earthquake*.
10. Li, F., Li, X., and Wang, J. (2018) Effects of interaction between dual shaking tables and specimen and force feedback compensation control. *Shock and Vibration*, vol. 2018, Article ID 6795763.
11. Rutao, S., Xianzhuang, X., Guangfeng, G., Wei, X., and Haitao, W. (2019, April) Motion control of dual electrohydraulic shaking tables system. *IEEE 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)* (pp. 970-974), IEEE.
12. Luco, J.E., Ozcelik, O., Conte, J.P., and Mendoza, L.H. (2011) Experimental study of the dynamic interaction between the foundation of the NEES/UCSD Shake Table and the surrounding soil: Reaction block response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**, 954-973.
13. Calvi, G.M. (2005) *Design of a Large-Scale Dynamic and Pseudo-Dynamic Testing Facility* (Doctoral dissertation, University of Pavia).
14. Ozcelik, O., Luco, J.E., Conte, J.P., Trombetti, T.L., and Restrepo, J.I. (2008) Experimental characterization, modeling and identification of the NEES-UCSD shake table mechanical system. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **37**(2), 243-264.
15. Nabati, F. and Ziyaeifar, M. (2019) Experimental studies on vibration transfer from foundation of a shaking table to the surrounding environment. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **53**(1), 395-410 (in Persian).

خاک در فرکانس های ۸ تا ۱۵ هرتز (در مسئله مورد بررسی این تحقیق) بالا بوده و امکان آسیب رسانی به اجزای غیر سازه ای و سلب آرامش از محیط اطراف افزایش می یابد. جداسازی پی موجب محدود شدن بازه فرکانسی تحریک انتقال یافته به خاک به کمتر از ۵ هرتز در مسئله مورد بررسی این تحقیق شده است.

مراجع

1. Ascione, L., Berardi, V., Feo, L., Fraternali, F., and Tralli, A.M. (2017) Experimental investigation of the dynamic performances of the LEDA shaking tables system.
2. Nakashima, M., Nagae, T., Enokida, R., and Kajiwara, K. (2018) Experiences, accomplishments, lessons, and challenges of E-defense—Tests using world's largest shaking table. *Japan Architectural Review*, **1**(1), 4-17.
3. Airouche, A., Aknouche, H., Bechtoula, H., Mezouer, N., and Kibboua, A. (2018) Performance of the CGS six DOF Shaking Table on the Harmonic Signal Reproduction. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **62**(1), 102-111.
4. Blondet, M. and Esparza, C. (1988) Analysis of shaking table- structure interaction effects during seismic simulation tests. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **16**(4), 473-490.
5. Rinawi, A.M., Clough, R.W., and Blondet, M. (1988, August) Pitching and interaction effects in EERC seismic simulator. *Ninth World Conference in Earthquake Engineering*, Japan.
6. Rinawi, A.M. and Clough, R.W. (1991) *Shaking Table-Structure Interaction*. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
7. Clark, A.J. (1992) Dynamic characteristics of large multiple degree of freedom shaking tables. *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, 2823-2828.
8. Ceresa, P., Brezzi, F., Calvi, G.M., and Pinho, R. (2012) Analytical modelling of a large-scale dynamic testing facility. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**(2), 255-277.

واژه نامه

Shaking Table	۱- میز لرزان
Specimen	۲- نمونه تحت آزمایش
Soil Foundation Interaction	۳- اندرکنش خاک پی
Mass	۴- جرم
Stiffness	۵- سختی
Vibration Transfer	۶- انتقال ارتعاش
Damping	۷- میرایی

Isolated Reaction Mass	۸- پی جداسازی شده
Rung-Kutta	۹- رانگک - کوتا
State Space	۱۰- فضای حالت
Imperial Valley	۱۱- امپریال والی
Friuli	۱۲- فریولی
Morganhill	۱۳- مرگان‌هیل
Northridge	۱۴- نورث‌ریج
Sanfernando	۱۵- سن‌فرناندو
Whittier Narrows	۱۶- ویترنروز
Elcentro	۱۷- ال‌سنترو
Base Line Corection	۱۸- تصحیح خط مبنا

Vibration Isolation on the Foundation of Shaking Tables and its Effects on Operational Performance of the Table and its Surrounding Environment

Farzaneh Nabati¹ and Mansour Ziyaeifar^{2*}

1. M.Sc. Graduate, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
2. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: mansour@iiees.ac.ir

Using shaking tables in experimental studies on buildings or other installations subjected to earthquake actions are considered inevitable in many circumstances. Due to their unique abilities in simulating ground motion effects on prototype systems, such facilities can provide the researcher with the most accurate and sophisticated results on the role of earthquake actions on the specimen under investigation. However, providing accuracy in ground motion simulation for shaking tables needs careful attention to its subsystems and dynamic interaction between them (specimen, table, actuators, control system and the foundation). In fact there is the possibility of a strong interaction between the shaking table itself and the specimen under investigation depending on its weight and frequency contents. Interaction between the table and its foundation assembly can also be considered important in certain cases. In addition, during shaking tables operation some vibrational force and energy can be transferred to its surrounding environment and causes undesirable effects in the nearby buildings. In this case, vibration isolation for the foundation of shaking table can partially solve this problem. However, it may also intensify the interaction between the table and its foundation that needs to be addressed properly to maintain the accuracy of the system in ground motion simulation. In this work a simplified model for investigation on the role of vibration isolation on foundation of shaking table assembly is proposed that takes into account the interaction problems among all subsystems of shaking tables. A large number of time integration analysis subjected to actual earthquake records (applied in the table's degree of freedom) have been carried out on this model. According to the results of this study, vibration isolation on a 4000 tons foundation of a typical middle size shaking table (6 by 6 meters in size with the weight of 40 tons) reduces, on average, the level of maximum acceleration transferring to the ground to about 1/3 of that for the non-isolated system. This has happened in the expenses of about ± 3 mm maximum lateral displacement for the foundation with respect to the ground. However, the results in this case also signifies sensible changes in the actuator's force, stroke and frequency demands that have to be provided to meet the required accuracy in the ground motion simulation. In addition, according to the results of this study the dominant frequency of vibration that transfers to the ground and the surrounding environment in case of non-isolated foundation is in the range of 8 to 15 Hertz while in the isolated system a low amplitude dominant frequency exist within the range of 5 Hz. Such results vary with the change in the mass and natural frequency of the specimen subsystem. According to these results vibration isolation for the foundation of shaking table is quite effective in reducing vibrational effects transferring to the surrounding environment and nearby buildings. On the other hand, using vibration isolation technique in design process for foundation of shaking tables may require a major upgrade in the technical specifications for actuators of the table and a need for more sophisticated control system hardware and its add-on algorithm and software.

Keywords: Shaking Table, Vibration Isolation, Soil Foundation Interaction, Vibration Transfer, Shaking Table Performance.