هفتمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
۲۸ تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۴

مدلسازی عددی میزلرزان و تاثیر ارتعاشات آن بر سازه‌های مجاور

فرزانه نباتی
دانشجو کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
f.nabati@iiees.ac.ir

منصور ضیایی فر
دانشیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
mansour@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: *میزلرزان ، اندرکنش خاک و میزلرزان، اندرکنش نمونه با میزلرزان، مدلسازی عددی*

چکیده

عملکرد میزلرزان به عنوان یک ابزار آزمایشگاهی به عوامل متعددی بستگی دارد. این عوامل می‌توانند عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار داده و باعث بروز خطا در آزمایش‌های صورت گرفته بر روی میز شوند. از مهمترین این عواملمی‌توان به اندرکنش پی با خاک، اندرکنش نمونه با عرشه میز و محدودیت‌های فیزیکی خود میزلرزان اشاره کرد. انتقال ارتعاشات از میزلرزه به محیط اطراف می‌تواند بر عملکرد سازه‌های مجاور نیز موثر باشد.یکی از راهکارهای مناسب جهت تحلیل عملکرد میزلرزان مدلسازی عددی آن است. در این مطالعه یک مدل ریاضی ساده از میزلرزه با در نظر گرفتن درجات آزادی محدود، جهت بررسی عملکرد سیستم محرک میزلرزان مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی انتقال ارتعاشات از میز به محیط پیرامونی و تاثیر آن بر سازه‌های مجاور نیز در مدلسازی در نظر گرفته شده است.

مقدمه

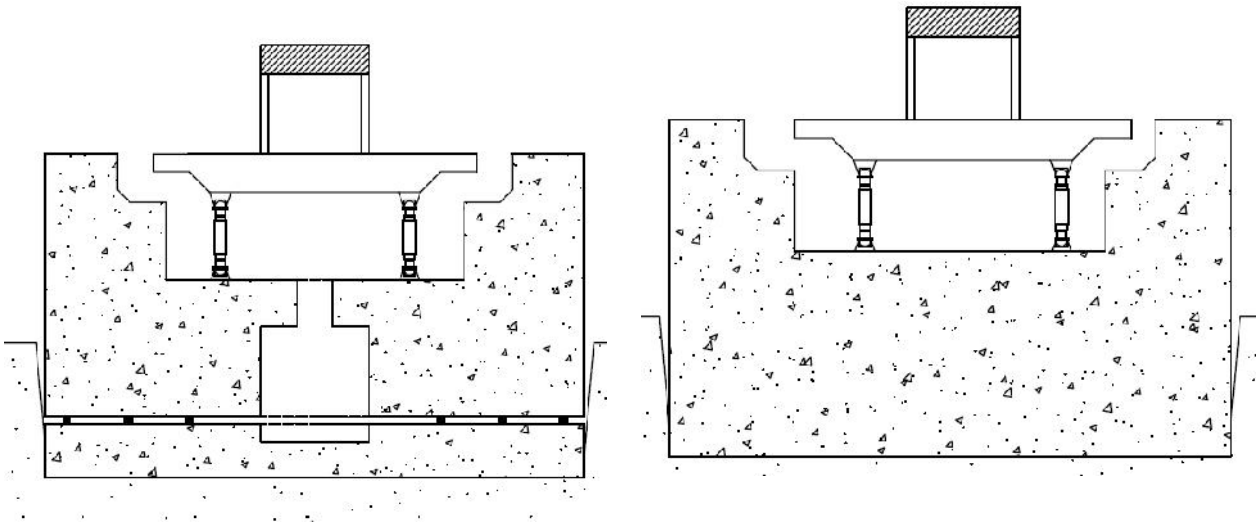
میزلرزان ابزاری ارزشمند در بخش ارتعاشات مهندسی عمران محسوب می‌گردد. این ابزار امکان مطالعه رفتار دینامیکی سازه‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف را فراهم می‌آورد. بررسی پاسخ آزمایش‌های انجام شده روی بسیاری از میزهای لرزان نشان می‌دهد که دقت نتایج به دست آمده وابسته به عملکرد میز است. عوامل متفاوتی می‌توانند در عملکرد میزلرزان خطا ایجاد کنند. اندرکنش عرشه میز با نمونه و اندرکنش خاک با پی مهمترین عوامل تاثیرگذار بر عملکرد میز محسوب می‌شوند. در مطالعات صورت گرفته توسط (Abdulkarim et al. 1988) بیان شده است که اندرکنش عرشه میز با نمونه در آزمایش سازه‌های بلند و سنگین موجب بروز پیچش و چرخش در میز می‌گردد. در تحقیقات انجام شده برای ساخت میزلرزان EUCENTRE(Ceresa et al. 2005)بیان گردیده است که اندرکنش میان پی با میزلرزان موجب ایجاد درجات اضافی ناخواسته در میز می‌گردد. مدلسازی عددی یکی از روش‌های مورد استفاده جهت مطالعه عوامل تاثیرگذار بر عملکرد میز است.مدل ارائه شده برای میزلرزان در این مطالعه بر طبق معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت میزلرزان نوشته شده است و به ارزیابی عملکرد سیستم محرک میز و اثرات انتقال ارتعاشات از میز به سازه‌های مجاور می‌پردازد. مدلسازی با استفاده‌از مشخصه‌های میزلرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله انجام گرفته است. مشخصه‌های دینامیکی خاک در این بررسی با استفاده از آزمایش ارتعاش اجباری حاصل گردیده‌است. به دلیل شناخت محدود از مشخصات خاک زیر پی، احتمال انتشار امواج در خاک و انتقال ارتعاشات به سازه‌های مجاور می‌رود. با در نظر گرفتن این نکته طراحی پی میزلرزه پژوهشگاه به نحوی صورت پذیرفته است که بتوان با قرار دادن میراگرها به صورت یک لایه در مقطع مشخصی از پی از انتقال ارتعاشات به زمین جلوگیری کرد. در این مدلسازی تاثیرات این طراحی بر سیستم محرک و انتقال ارتعاشات به محیط پیرامونی میز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مدل ریاضی پیشنهادی

بیشتر مدلسازی‌های صورت گرفته از میزلرزان، سیستم کنترلی میز را مورد بررسی قرار می‌دهند. در مدلسازی‌های ارائه شده برای میزهای لرزان دانشگاه پرو Blondet and Esparza (1988) و میزلرزان IWHR،Plummer(2008) بیشتر تمرکز بر نحوه حذف اندرکنش میان نمونه و میز توسط سیستم کنترلی قرار داده شده است. مدلسازی‌های محدودیارائه شده‌اندکه به بررسی عملکرد دینامیکی میز با حضور همزمان اندرکنش

میز با نمونه و خاک با پی می‌پردازند. از آن جمله می‌توان به مدل (Ceresa et al. 2005) اشاره کرد. در این مدلسازی میزلرزان به دو قسمت (نمونه و میز،خاک و پی) تقسیم شده است و اندرکنش خاک و پی با استفاده از روابط دینامیکی حاکم بر حرکت میز مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که اشاره شد، در کمتر مدلسازی اثر انتقال ارتعاشات از میز به سازه‌های مجاور مورد بررسی قرار می‌گیرد.در این بررسی مدل ساده ای میزلرزه شش درجه آزاد پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله ارائه می‌گردد. برای مدلسازی کامل میزلرزان لازم است تا تمام بخش‌های تشکیل دهنده (عرشه میز، سازه تحت آزمایش، پی، خاک، جک هیدرولیکی و سیستم کنترلی) با تمام درجات آزادی خود در مدل آورده شوند که این امر پیچیدگی‌های فراوانی را به دنبال دارد.شکل(۱) مقطعی از میزلرزان پژوهشگاه زلزلهرا نشان می‌دهد. همانگونه که در بخش قبل بیان شد برای کاهش حجم ارتعاشات انتقال یافته از میز به خاک طراحی پی میز تغییر داده شده است.

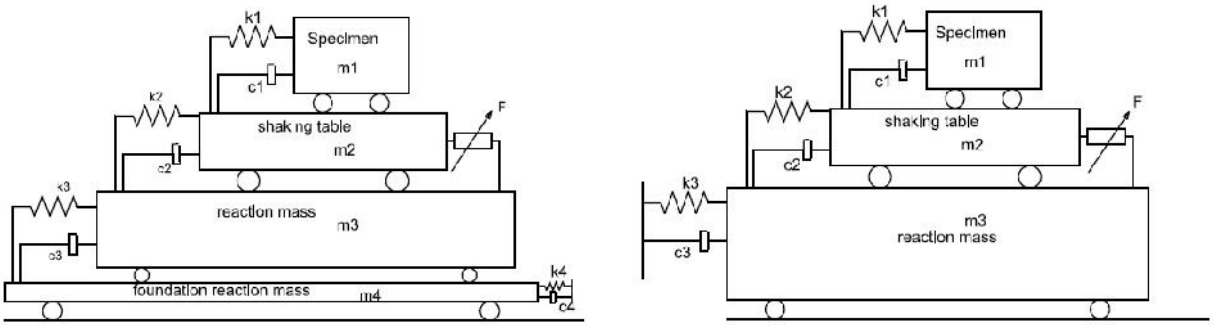
الف) ب)



شکل۱:الف) سیستم پی جرم صلب ب)سیستم پی جداسازی شده.

شکل(۲) مدل ریاضی از هر دو طراحی میزلرزان را نشان می‌دهد. در این مدلسازی برای هر بخش مدلسازی شده (سازه تحت آزمایش، عرشه میز و پی) یک درجه آزادی در نظر گرفته شده است. بنابراین در این بررسی پاسخ‌های مدل‌های سه درجه آزاد و چهار درجه آزاد با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

الف) ب)



شکل۲: الف) مدل ریاضی میز با پی صلب. ب) مدل ریاضی میز با پی جداسازی شده

در مدل های ارائه شده از میز، فنرها و میراگرهامشخص کننده سختی و میرایی بخش‌های مختلف سیستم میزلرزان هستند. پس از معرفی مدل ریاضی میز لازم است تا معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سیستم نوشته شود.

معادلات دینامیکی سیستم

در سیستم‌های چند درجه‌آزاد به منظور تبیین معادله تعادل در سیستم بر حسب معادله نیوتون لازم است تا در هر درجه آزادی از سیستم

معادله نیرویی زیر ارضا گردد:

$$f_I + f_D + f_S = p(t) \quad (۱)$$

در معادله بالا f_I معرف نیروی اینرسی، f_D معرف نیروی میرایی، f_S معرف نیروی ارتجاعی و $p(t)$ معرف نیروی خارجی وارده بر سیستم هستند.بنابراین معادلات دینامیکی برای مدل‌های سه درجه آزاد و چهار درجه آزاد از میز بر حسب معادله (۱) محاسبه می‌شوند. گروه معادلات (۲ و (۳) به ترتیب معادلات دینامیکی حرکت مدل‌های سه و چهار درجه آزاد را مشخص می‌کنند.

معادلات مدل سه درجه آزاد:

$$\begin{aligned} &m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 - c_1\dot{x}_2 - k_1x_2 = 0 \\ &m_2\ddot{x}_2 + (c_1 + c_2)\dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_2 - c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 - c_2\dot{x}_3 - k_2x_3 = F \\ &m_3\ddot{x}_3 + (c_3 + c_2)\dot{x}_3 + (k_3 + k_2)x_3 - c_2\dot{x}_2 - k_2x_2 = -F \end{aligned} \quad (۲)$$

معادلات مدل چهار درجه آزاد:

$$\begin{aligned} &m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 - c_1\dot{x}_2 - k_1x_2 = 0 \\ &m_2\ddot{x}_2 + (c_1 + c_2)\dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_2 - c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 - c_2\dot{x}_3 - k_2x_3 = F \\ &m_3\ddot{x}_3 + (c_3 + c_2)\dot{x}_3 + (k_3 + k_2)x_3 - c_2\dot{x}_2 - k_2x_2 - k_3x_4 - c_3\dot{x}_4 = -F \\ &m_4\ddot{x}_4 + (c_3 + c_4)\dot{x}_4 + (k_3 + k_4)x_4 - k_3x_3 - c_3\dot{x}_3 = 0 \end{aligned} \quad (۳)$$

سازه محل نصب میزلرزان، دارای ۲۶ متر ارتفاع و پریودی حدود ۰.۳ ثانیه است. انتقال این ارتعاشات از میز به پایه این سازه می‌تواند موجب تحریک این سازه گردد. برای بررسی عملکرد این سازه، شتاب ایجاد شده روی زمین ($\ddot{x}_3$ در مدل سه درجه آزاد و $\ddot{x}_4$ در مدل چهار درجه آزاد)به عنوان ارتعاش ورودی به سازه مجاور در نظر گرفته شده و با حل معادله (۴) پاسخ سازه مجاور حاصل می‌گردد. با استفاده از این رابطه طیف پاسخ سازه مجاور به دست آورده خواهد شد.

$$m\ddot{x}_5 + c\dot{x}_5 + kx_5 = -m\ddot{x}_{4or3} \quad (۴)$$

در معادلات ارائه شده از میز c_1, k_1, m_1به ترتیب مشخصه های مربوط به جرم، سختی و میرایی سازه تحت آزمایش، c_2, k_2, m_2 مشخصه های مربوط به جرم، سختی و میرایی میز، c_3, k_3, m_3و c_4, k_4, m_4مشخصه های مربوط به جرم متعادل کننده(پی) و c, k, m مشخصه‌های سازه مجاور هستند. F نیز معرف نیروی جک هیدرولیکی است.از آنجا که نیروی وارده بر سیستم و یا شتاب وارده بر آن به عنوان بار ورودی به سیستم تابع دلخواهی و یا پیچیده‌ای از زمان است، حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل حرکت سیستم معمولا بسیار پیچیده و گاها غیر ممکن است. برای حل معادلات حرکت حاکم بر این سیستم از روش عددی گام به گام زمانی استفاده می‌کنیم. در این مطالعه روش رانگ کوتا به عنوان روش حل عددی انتخاب شده است. در حل عددی رانگ کوتا برای حل معادلات در هر گام تنها به پاسخ‌های گام قبلی نیاز است.در حل معادلات این نکته قابل ذکر است که تغییر مکان میز مشخص و نیروی وارده از جک هیدرولیکی به عرشه میز نامشخص فرض می‌گردد.به این صورت اندرکنش نمونه با میز از مدلسازی حذف گردیده است. معادلات به دست آمده از این طریق مشابه با معادلات نشست تکیه‌گاهی حل می‌شوند، لذا شتاب، سرعت و تغییرمکان میز برای حل معادلات لازم هستند. حل معادلات به این صورت کمتر در مسائل دینامیکی دیده شده است.

مشخصه‌های سیستم

مشخصه‌های مربوط به عرشه میز و نمونه میز در جدول (۱) آورده شده است. مشخصه‌های عرشه میز مطابق با گزارش سازنده میز در نظر گرفته شده است. برای نمونه وزن و نسبت میرایی ثابت در نظر گرفته شده است ولی برای مطالعه عملکرد میز پریود نمونه بین ۰.۱ تا ۲.۵ ثانیه متغیر فرض شده است.

جدول۱: مشخصات میزلرزان و نمونه

بخش مدلسازی شده	وزن(تن)	پریود(ثانیه)	نسبت میرایی(درصد)
میز	۴۰	-	۵
نمونه	۲۰	فرض شده است	۵

در مدل سه درجه آزاد وزن پی برابر با ۴۳۰۰ تن و پریود و نسبت میرایی آن برابر با سختی و میرایی خاک در نظر گرفته شده‌است. در

مدل چهار درجه آزاد وزن قسمت متحرک پی برابر با ۳۶۰۰ تن و وزن قسمت صلب برابر ۸۰۰ تن است. در قسمت صلب همانند مدل سه درجه آزاد پریود و نسبت میرایی برابر با پریود و نسبت میرایی خاک است ولی در قسمت متحرک نسبت میرایی برابر با ۵ درصد و پریود این قسمت در ارتعاش قائم برابر با ۰.۵ ثانیه و در حالت ارتعاش افقی برابر با ۱.۵ ثانیه فرض گردیده است. تفاوت در پریود ارتعاشی از آن جهت در میرا کردن ارتعاش در حالت ارتعاش افقی آسانتر از میرا کردن ارتعاش قائم است.

جدول۲: مشخصات دینامیکی خاک

نوع ارتعاش	پریود(ثانیه)		نسبت میرایی (درصد)
افقی	مدل سه درجه	۰.۱۲	۱۰
	مدل چهار درجه	۰.۰۴۵۶	
قائم	مدل سه درجه	۰.۰۶۲	۱۶.۲
	مدل چهار درجه	۰.۰۲۶	

برای استخراج مشخصه‌های خاک از آزمایش ارتعاش اجباری برروی پی میزلرزه پژوهشگاه استفاده شده است. این آزمایش با یک دستگاه لرزاننده با ظرفیت ایجاد نیرویی حداکثر برابر با ۳۰۰۰ کیلوگرم با بارگذاری به صورت جاروی فرکانسی بین ۰ تا ۲۰ هرتز انجام شده است. پاسخ شتاب حاصل از ارتعاش دستگاه لرزاننده‌در فواصل مختلف ثبت گردید. برای استخراج مشخصه‌های خاک از پاسخ‌های ثبت شده در ایستگاه لبه کناری پی استفاده شده است. مشخصه‌های به دست آمده در جدول (۲) بیان شده است.

الف)

ب)

شکل۳: الف) پی میزلرزان پژوهشگاه ب) دستگاه لرزاننده نصب شده روی پی

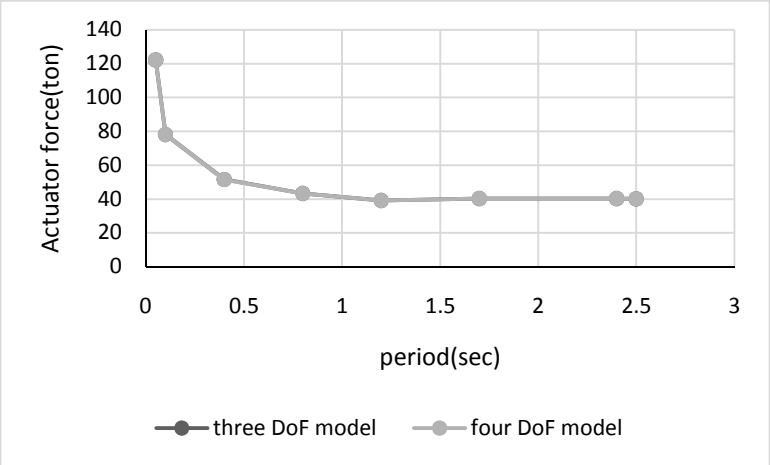
تحلیل عملکرد میزلرزان

بارگذاری زلزله برای ارزیابی تاریخچه زمانی عملکرد سیستم محرک میز مورد استفاده قرار گرفته است. در این بررسی ۷ زلزله با مشخصات آورده شده در جدول(۳) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. میزلرزان پژوهشگاه امکان ایجاد شتابی برابر با شتاب ثقل را دارد به همین دلیل زلزله‌ها مطابق با آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله با 1g همپایه شده اند.

جدول۳: زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل حساسیت

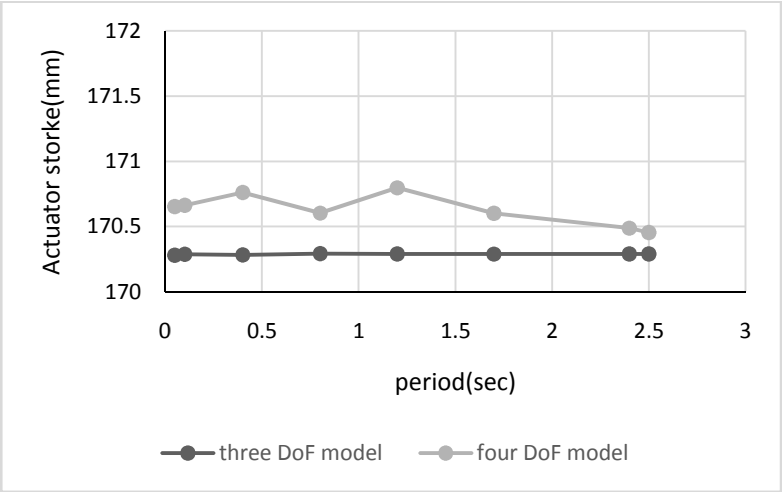
نام زلزله	شدت زلزله
السنترو	۰.۳۱g
فیوریلی	۰.۳۵g
ایمپریالوی ۱۹۸۰	۰.۳۵g
مورگان هیل	۰.۳۱g
نورث ریج	۰.۵۶g
سن فرناندو	۰.۳۲g
ویترنروو	۰.۳۱g

با در نظر گرفتن نمونه با وزن ثابت و پریود متغیر، زلزله‌های مختلف به عنوان ورودی میزلرزان به مدل وارد شده اند و مقدار نیروی و تغییر مکان جک هیدرولیکی برای مدل سه درجه و چهار درجه برای محاسبه شده‌اند. شکل‌های(۴)و(۵) میزان تغییرات نیرو و تغییر مکان بازوی جک را برای هر پریود مشخص از نمونه با میانگین‌گیری بین پاسخ به دست آمده اززلزله‌های مختلف را نشان می‌دهند.



شکل۴: تغییرات نیروی دینامیکی جک هیدرولیکی

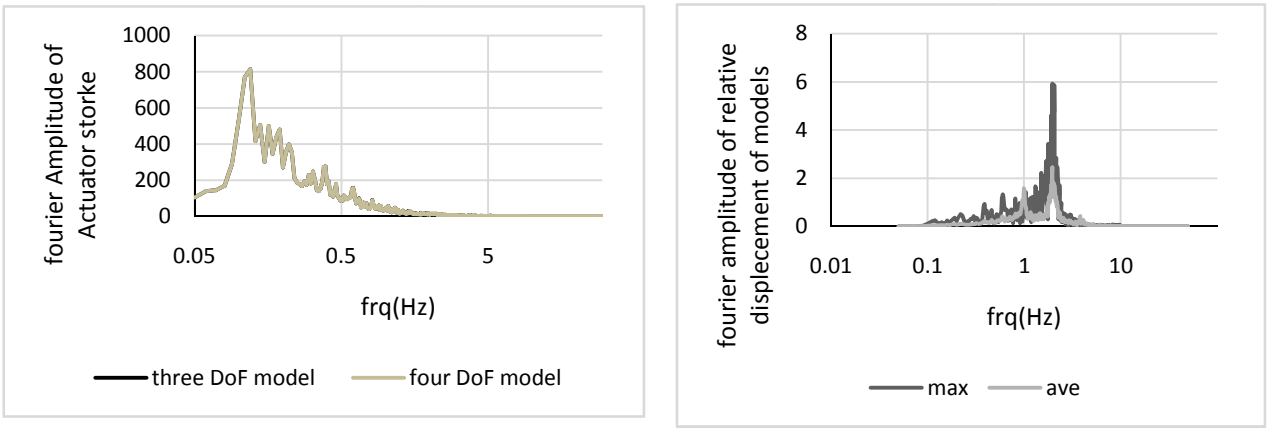
همانطور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشخص است، تغییر در نوع مدلسازی تاثیری بر مقدار نیرو و تغییرمکان دینامیکی جک ندارد ولی اگر ظرفیت جک برابر با ۴۵ تن فرض گردد، برای نمونه‌ها با پریود کم(سختی زیاد)، جک ظرفیت لازم برای تولید زلزله‌ها بر روی میز را نخواهد داشت.



شکل۵: تغییرات جابجایی بازوی دینامیکی جک هیدرولیکی

برای بررسی تاثیر تغییر مدل بر عملکرد جک هیدرولیکی، ارزیابی تغییرمکان بازوی آن در حوزه فرکانسی هم صورت گرفته است. به این منظور تفاضل پاسخ تاریخچه زمانی تغییر مکان بازوی جک در مدل‌های سه درجه آزاد و چهار درجه آزاد محاسبه شده‌است و از این مقدار تبدیل فوریه گرفته شده است. شکل(۶) دامنه تبدیل فوریه این تفاضل را مشخص می‌کند. بر حسب این گراف‌ها دامنه فوریه تفاضل تغییرمکان جک نسبت به دامنه فوریه تغییرمکان جک بسیار اندک است ولی نمی‌توان از این مقدار اندک صرف نظر کرد.

ب)



الف)

شکل۶: الف) تغییرات فرکانسی تفاضل بازوی دینامیکی جک برای دو مدل. ب) تغییرات فرکانسی بازوی جک در دو مدل

با انجام هر تحلیل تاریخچه زمانی، شتاب ایجادی روی زمین ثبت گردیده‌است. این شتاب به عنوان ارتعاش ورودی برای سازه مجاور در نظر گرفته شده است و طیف پاسخ شتاب سازه مجاور حاصل گردیده است. شکل‌های (۷) و (۸) طیف پاسخ شتاب میانگین زلزله‌های مختلف را نشان می‌دهند. همانگونه که از گراف‌ها مشخص است تبدیل پی از یک پی صلب به پی با یک قسمت متحرک باعث می‌گردد تا سازه مجاور میز ارتعاش بسیار اندکی داشته باشد.

الف)

ب)

شکل۷: الف) طیف سازه مجاور میز در مدل سه درجه آزاد. ب) طیف سازه مجاور در مدل چهار درجه آزاد

نتیجه‌گیری

در طراحی پی میزلرزه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله برای کاهش انتقال ارتعاشات از میز به محیط پیرامون پی به صورت دو لایه طراحی شده‌است. با در نظر گرفتن این نکته، در این پژوهش مدل عددی از میزلرزان ارائه گردید که با استفاده از آن می‌توان عملکرد جک‌های هیدرولیکی میز و تاثیر انتقال ارتعاشات از میز به محیط پیرامون مورد بررسی قرار داد. در این مدلسازی نتایج یک مدل سه درجه آزاد از میز با یک مدل چهار درجه آزاد مقایسه گردید. با مرور نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان یافته‌های این تحقیق را به شرح زیر بیان کرد:

۱- تغییر در نوع پی میزلرزان تاثیری اندکی بر تغییرات تاریخچه زمانی بر عملکرد سیستم محرک میز (نیروی وارده و تغییرمکان بازوی هیدرولیکی) دارد و اختلالی را در عملکرد میز ایجاد نمی‌نماید.

۲- بررسی تفاضل تغییرمکان بازوی دینامیکی در مدل‌های سه و چهار درجه آزادی در حوزه فرکانسی نشان می‌دهد که دامنه اختلاف ایجاد شده در بازوی جک در این دو مدل دارای دامنه اندکی نسبت به دامنه اصلی تغییرمکانی جک دارد ولی نمی‌توان از آن صرف نظر کرد زیرا حذف این دامنه از سیستم باید از طریق مطالعه اندرکنش با سیستم کنترلی صورت گیرد که در انجام این تحقیق سیستم کنترلی در مدلسازی مد نظر نبوده است.

۳- تغییر پی از یک جرم صلب به یک پی جداسازی شده ، باعث کاهش عمده در انتقال ارتعاشات به محیط پیرامون میز می‌گردد .

مراجع

Abdulkarim, M., & BLONDET, J. M. (1988). PITCHING AND INTERACTION EFFECTS IN EERC SEISMIC SIMULATOR. In Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering (Vol. 1, p. 5). Japan Association for Earthquake Disaster Prevention.

Blondet, M., & Esparza, C. (1988). Analysis of shaking table-structure interaction effects during seismicsimulation tests. Earthquake engineering & structural dynamics, 16(4), 473-490.

Ceresa, P., Brezzi, F., Calvi, G. M., & Pinho, R. (2012). Analytical modelling of a large-scale dynamic estingfacility. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41(2), 255-277.

Plummer, A. R. (2008). A detailed dynamic model of a six-axis shaking table. Journal of Earthquake Engineering, 12(4), 631-662.