تعیین خصوصیات دینامیکی پی میز لرزان پژوهشگاه به کمک آزمایش ارتعاش اجباری

نقدعلی حسین‌زاده
استادیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
hosseinz@iiees.ac.ir

بهروز سلطانی
دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
b.soltani@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: *میز لرزان، اندرکنش دینامیکی، دستگاه‌های لرزاننده، فرکانس، میرایی*

چکیده

در این مقاله خصوصیات دینامیکی میز لرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرد. این خصوصیات از جمله پارامترهای اصلی برای بررسی عملکرد صحیح میز لرزان و صحت و دقت نتایج آزمایشات مربوطه محسوب می‌شود. بنابراین، قبل از انجام آزمایش‌ها روی میز لرزان، لازم است عوامل مؤثر در عملکرد میز لرزان مانند: ارتعاشات ناشی از اندرکنش میز با مدل‌های سازه‌ای و همین طور اثرات اندرکنش میز با پیِ و محیط اطراف بخوبی شناخته شوند. در صورتی‌که پی بر بستر کاملاً صلب قرار گرفته باشد هیچ‌گونه اندرکنشی رخ نمی دهد. ولی در حالت خاک نرم، پی به همراه خاک اطراف به ارتعاش در می آید. بنابراین اثرات اندرکنش دینامیکی میز لرزان با خاک اطراف پی باید مورد توجه قرار گیرد.

برای انجام آزمایش‌های ارتعاش محیطی و اجباری سیستم فونداسیون میز لرزان از دستگاه‌های لرزه‌نگاری پژوهشگاه و دستگاه‌های لرزاننده (Shaker) استفاده شده است. سپس با پردازش اطلاعات ثبت شده مشخصات دینامیکی سیستم شامل فرکانس و میرایی آن در محدوده ارتعاشات کم دامنه تعیین گردیده است.

مقدمه

پی دستگاه‌هایی نظیر موتورهای الکتریکی، دستگاه‌های مکانیکی، ژنراتورها و ..... معمولا تحت تاثیر ارتعاشات دینامیکی قرار دارند. به علاوه در هنگام زلزله تمام پی‌ها نظیر پی ساختمان‌ها، پل‌ها، مخازن و .... تحت ارتعاشات دینامیکی قرار می‌گیرند. اگر این ارتعاشات بیش از حد مجاز باشند ممکن است منجر به شکست یا خسارات خود پی‌ها، دستگاه‌ها و یا سازه‌ها گردند. علاوه بر این درصورتی که فرکانس و دامنه ارتعاشات پی دستگاه‌ها کنترل نشده باشد ممکن است در سازه مورد نظر تاثیر زیادی داشته باشد. اگرچه مدل‌های تحلیلی گوناگونی برای تعیین رفتار دینامیکی پی‌ها ارائه شده است، اما گزارش‌های کمتری در مورد آزمایش‌های ارتعاش اجباری روی پی‌ها و به ویژه پی‌های سنگین در دسترس می‌باشد. هدف از این مقاله ارائه پارامترهای دینامیکی مربوط به پی میز لرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با استفاده از انجام آزمایش ارتعاش اجباری در سایت مورد نظر به وسیله دستگاه لرزاننده (Shaker) می‌باشد.

درصورتی که پی بر روی مصالح صلب مانند سنگ و یا صخره بنا شده باشد اندرکنشی بین سازه وخاک رخ نمی‌دهد. اما اگر خاک پی خیلی نرم باشد، ارتعاشات سازه ونیروهای ناشی از آن بر روی خاک، می‌تواند بر حرکات پای ساختمان و در نتیجه بر محیط اطراف تاثیرداشته باشد. در سازه‌های حساس ومهم مانند راکتورهای اتمی وسدها لزوم بررسی این اثرات بیشتر بوده و حتماً می‌بایست در نظر گرفته شوند تا تدابیر لازم برای کاهش اثرات مخرب آنها اتخاذ گردد. همین‌طور سازه‌های بلند و یا خیلی سنگین نیز ممکن است از این پدیده متأثر شوند بخصوص اگر خاک زیر پی آنها نرم باشد. پارامترهائی که می‌توانند در نتیجهٔ اندرکنش آثار متفاوتی روی مودهای ارتعاش نامطلوب میز لرزان و پریود ارتعاشیِ آن داشته باشند شامل: ارتفاع مدل، وزن مدل، مشخصات مکانیکی خاک، جنس و ابعاد و وزنِ پی می‌باشند.

بهنام‌فر و سوگی مورا در سال ۱۳۷۷ تحلیل دینامیکی سازه‌های باپی سطحی یامدفون تحت اثر زمین‌لرزه متغیر در مکان و اثر سازه‌های مجاور را مورد مطالعه قرارداده‌اند که مبتنی بر مطالعات تحلیلی و عددی می‌باشد. گتمیری و حائری در سال ۱۳۷۵ راهنمای تحلیل بر هم کنش دینامیکی خاک- سازه و اثرات آن بر واکنش دینامیکی سازه را ارائه نمودند. حسین‌زاده و ناطقی‌الهی در سال ۱۳۸۱ اثرات اندرکنش دینامیکی

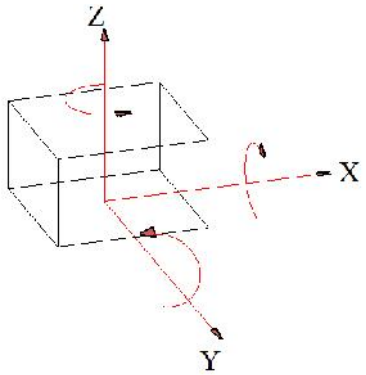
سازه‌های ساختمانی منفرد و مجاور هم روی خاک به کمک آزمایش‌های دینامیکی روی میز لرزان بررسی قرارداده‌اند. همچنین رعیت رکن‌آبادی در سال ۱۳۸۸ و حسین‌زاده در سال ۱۳۸۱ مطالعه تجربی- تحلیلی اثرات اندرکنش خاک- سازه بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌های متداول با پی‌های سطحی و مدفون را مورد توجه قراردادند.

رینـاوی و کلاف در سال ۱۹۹۱ میلادی (Rinawi and clough, 1991) به بررسی مسأله اندرکنش میز لرزان دانشگاه برکلی (به ابعاد شش در شش متر) با مدل‌های سازه‌ای پرداخته و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های سنگین و بلند مهمترین اثرات را ایجاد می‌کنند. رئا و همکاران او قبلاً در سال ۱۹۷۷ (Rea. Et al, 1977) دریافته بودند که اثرات درگیری پی با میز لرزان فقط در فرکانس‌های پائین قابل‌توجه می‌باشد. هال وکیسن فنینگ در سال ۱۹۷۶ (Hall and kissenp fenning, 1976) روش‌های اجزاء محدود و پارامتر متمرکز را برای محفظه‌های مواد هسته‌ای هم با استفاده از پارامترهای وابسته به فرکانس و هم غیروابسته به فرکانس انجام دادند. آنها دریافتند که پارامترهای غیروابسته به فرکانس برای محاسبات پاسخ اندرکنش خاک- سازه کافی هستند. سید و لیسمر در سال ۱۹۷۸ (Seed and Lysmer, 1978) پیشنهاد کردند که روش‌های اجزاء محدود برای طراحی تأسیسات هسته‌ای ابزار قدرتمندی است و در یافتند که وقتی روش‌های مختلف با قضاوت مهندسی خوبی همراه باشد و محدودیت‌ها را به‌طور کامل در نظر بگیرد، منجر به پاسخ‌هایی با دقت کافی در طرح مهندسی می‌شود. چن و همکاران در سال ۱۹۷۹ (chen et al, 1979) یک راکتور را که به‌طور عمیقی در زمین فرو رفته بود با روش اجزاء محدود و با استفاده از روش مستقیم انتگرال گام به گام زمانی تحلیل کردند. آنها مشاهده کردند که دامنه حرکت افقی ورودی درزیر پی به‌طور قابل ملاحظه‌ای در نتیجه فرورفتگی پی صلب کاهش می‌یابد. فرو رفتگی پی باعث افزایش قابل توجه گیرداری افقی، سختی دورانی گهواره‌ای (دوران حول محورهای افقی) و میرایی تشعشعی می‌شود. میمند در سال ۱۹۹۸ (Meymand, 1998) به مطالعه اثرات مدل خاک– شمع با میز لرزان پرداخته است. براساس این مطالعه ضریب مقیاس مدل‌سازی و همچنین مدهای ارتعاشی نامطلوب میز عملکرد آن را تغییر می‌دهند.

آزمایش ارتعاش اجباری

پی مورد نظر مطابق شکل ۱ می‌باشد که در امتداد محورهای اصلی و یا حول هر یک محورها دارای درجه آزادی بوده و قابلیت ارتعاش دارد. بنابراین پی مورد نظر یک سیستم دینامیکی شش درجه آزادی محسوب می‌شود که عبارتند از: ارتعاش انتقالی در امتداد محورهای x , y , z و ارتعاش دورانی حول محور x یا y (که به ارتعاش گهواره‌ای معروفند) و ارتعاش دورانی حول محور z (که به ارتعاش پیچشی معروف است). در میان این شش درجه آزادی، معمولا ارتعاشات انتقالی در امتداد قائم (z) و ارتعاشات دورانی در حول محور z (ارتعاشات پیچشی) مستقل از درجات آزادی دیگر است.

آنچه که تحلیل دینامیکی پی‌ها را از تحلیل دینامیکی سازه‌ها متمایز می‌کند، وجود خاک در اطراف پی و اثر آن بر پاسخ پی که با اندرکنش خاک و سازه معرفی می‌شود، می‌باشد. دال بتنی که متکی بر خاک زیرین است وظیفه انتقال کلیه نیروهای استاتیکی و دینامیکی ناشی از ساختمان‌ها و ماشین‌آلات را به زمین ایفا می‌کند. بنابراین در نقاط اتصال پی به زمین اندرکنش دینامیکی خاک و پی به وجود می‌آید.



شکل ۱: درجات آزادی ارتعاشی انتقالی و دورانی پی

این آزمایش به منظور تعیین خصوصیات دینامیکی پی مورد نظر از قبیل فرکانس‌های ارتعاشی شکلهای مودی و میرایی انجام گردیده است. در این آزمایش، دستگاه لرزاننده (Shaker) در وسط پی نصب گردیده و در فرکانس‌های مختلف ارتعاشات هارمونیکی به سیستم اعمال شده است. ارتعاشات در دو جهت افقی و همچنین در جهت قائم ایجاد شده است. همزمان با تولید ارتعاشات هارمونیکی، در چهار طرف فوندانسیون از شتابنگار برای ثبت ارتعاشات استفاده شده است. در هر طرف از سه شتابنگار برای اندازه گیری ارتعاشات در هر سه جهت متعامد استفاده شده است. دستگاه لرزاننده مورد استفاده از نوع جرم دوار بوده که فاصله مرکز جرم‌های نامتوازن تا محور دوران با شاخصی تحت عنوان زاویه نامتوازن

تغییر می‌کند. حدود تغییرات این زاویه از ۰ تا ۶۰ درجه می‌باشد. با تغییر این زاویه، گشتاور جرم نامتوازن تولید شده در دستگاه نیز مطابق رابطه (۱) تغییر خواهد کرد. به این ترتیب دستگاه قابلیت ایجاد بار هارمونیک با دامنه و فرکانس دلخواه را مطابق روابط (۲) و (۳) را دارا می باشد.

$$M = 288.7 \sin \sim \quad (۱)$$

$$A = M\mu^2 / g \quad (۲)$$

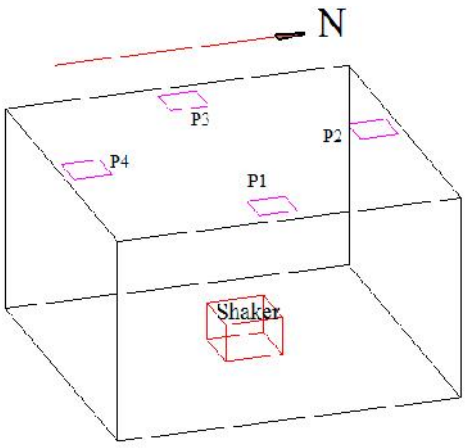
$$F = A \sin \mu t \quad (۳)$$

برای تولید بارهای هارمونیکی دستگاه را روشن کرده و با تغییر تدریجی فرکانس از ۱ تا ۲۰ هرتز جاروی فرکانسی مطابق شکل ۲ و شکل ۳ انجام گردید. بدین‌ترتیب تمامی فرکانسهای ارتعاشی پی در محدوده صفر تا ۲۰ هرتز تحریک گردیده و توسط سنسورهای نصب شده در نقاط مختلف (شتابنگارها) ثبت گردید. در هر یک از نقاط P1 الی P4 سه شتابنگار در سه جهت اصلی شمالی N شرقی E و قائم V نصب شده است.

جدول ۱: مقدار تحریک ارتعاشی ورودی در وسط پی توسط دستگاه لرزاننده

جهت تحریک	زاویه نامتوازن (درجه)	گشتاور جرم نامتوازن (kg.cm)	فرکانس تحریک (هرتز)
افقی (شمال– جنوب)	۵۵	۲۳۶	۱ - ۱۵
	۴۰	۱۸۶	۱۵ - ۲۰
افقی (شرق– غرب)	۵۵	۲۳۶	۱ - ۱۵
	۴۰	۱۸۶	۱۵ - ۲۰
قائم	۵۵	۲۳۶	۱ - ۱۵
	۴۰	۱۸۶	۱۵ - ۲۰

شکل ۲: موقعیت دستگاه لرزاننده در پی



شکل ۳: موقعیت شماتیکی دستگاه لرزاننده و شتابنگارها در پی

تعیین خصوصیات دینامیکی پی

پی مورد نظر دارای ابعاد ۱۵× ۱۵ متر در پلان و ۹ متر ارتفاع می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است. این پی با وزن حدود ۵۰۰۰ تن از نوع پی‌های حجیم محسوب می‌شود. با پردازش اطلاعات ثبت شده، خصوصیات دینامیکی این پی (فرکانس ارتعاشی مودی و میرایی و ....) در هر درجه آزادی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

شکل ۴: مشخصات پی میز لرزان

تعیین فرکانس طبیعی و میرایی پی

روابط دینامیکی ارتعاشی سیستم دینامیکی تکدرجه تحت بار هارمونیک، پایه‌ای برای تعیین فرکانس طبیعی و نسبت میرایی پی مورد مطالعه به کمک اطلاعات حاصل از پاسخ سازه تحت بارهای ورودی نوسانی ناشی از دستگاه لرزاننده می‌باشد. اطلاعات بدست آمده در خصوص فرکانس و میرایی، اطلاعات مهم سازه می‌باشند که برای مقایسه و اصلاح مقادیر تحلیلی متناظرآنها حائز اهمیت است. فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده در آزمایش دینامیکی مورد نظر شامل تاثیر تمام عناصر سازه ای موثر اعم از پی و خاک و محیط اطراف می باشد که منظور کردن آنها در یک تحلیل ایده‌آل امکان پذیر نیست. آزمایش ارتعاش اجباری منجر به حصول روش‌های بهتری برای ایده‌آل سازی سازه می گردد و نماینده بهتری از سازه واقعی محسوب می‌گردد برای پردازش اطلاعات ثبت شده در هنگام آزمایشات دینامیکی محدوده تشدید یا رزونانس تشخیص داده میشود. سپس منحنی پاسخ فرکانسی مربوط به آن محدوده رسم می گردد. به این ترتیب فرکانس طبیعی سیستم بدست می اید. درنهایت برای بدست آوردن میرایی سیستم از منحنی پاسخ فرکانس به روش نیم‌توان استفاده شده است. اگر f_a و f_b دو فرکانس در دو طرف فرکانس تشدید f_n باشند که در آن دامنه پاسخ مساوی با ۰.۷۱ برابر دامنه فرکانس تشدید باشد، در این صورت برای مقادیر کوچک میرایی طبق رابطه ۴ داریم:

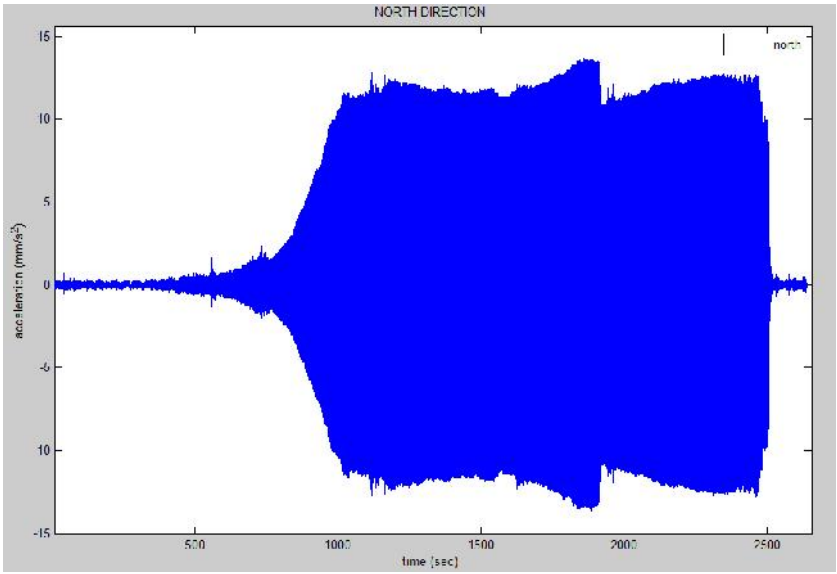
$$¶ = (f_b - f_a)/2f_n \qquad (۴)$$

مودهای ارتعاشی پی با پردازش اطلاعات

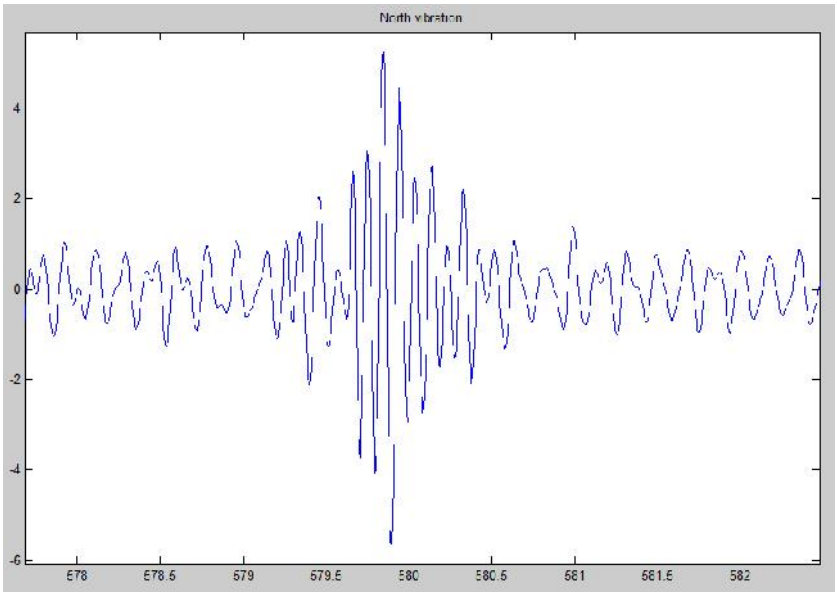
نتایج مربوط به ۳ درجه ازادی انتقالی و ۲ درجه ازاده دورانی حول محورهای x , y (راکینگ) و ۱درجه ازادی چرخشی حول محور z (پیچشی) بر اساس نتایج ازمایشی پردازش و محاسبه شده است. در صورت هم فاز بودن ارتعاشات سنسورهای هم جهت، مد مربوطه از نوع انتقالی، و در صورت غیر هم فاز بودن ارتعاشات مود از نوع راکینگ یا پیچشی خواهد بود.

مود انتقالی در جهت افقی X (شمال– جنوب)

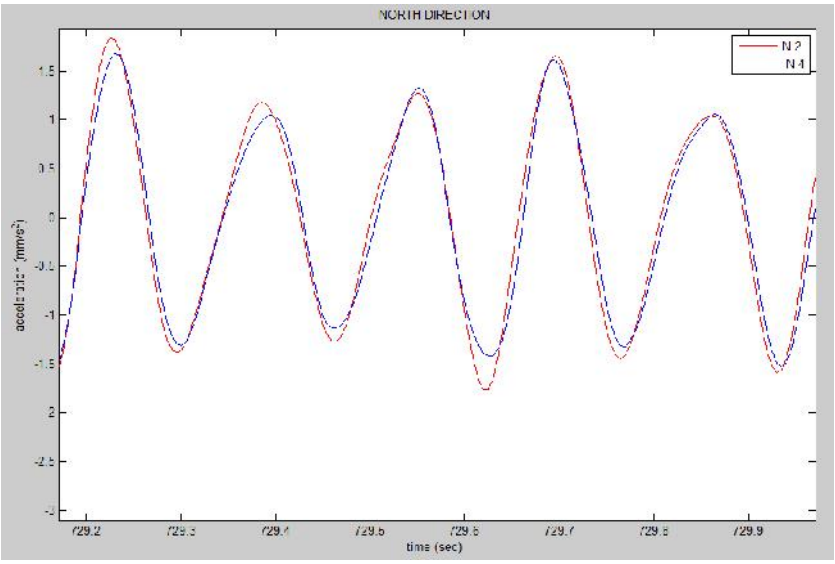
نمونه ای از ارتعاشات جانبی پی در جهت X (شمال– جنوب) به صورت جاروی فرکانسی در شکل ۵ نشان داده شده است. با پردازش این ارتعاشات خام و با تبدیل ارتعاشات از حوزه زمان به حوزه فرکانس، فرکانس‌های طبیعی و میرایی پی مورد نظر محاسبه میگردد. نمونه ای از مراحل پردازش اطلاعات در شکلهای ۶ الی ۱۰ نشان داده شده است.



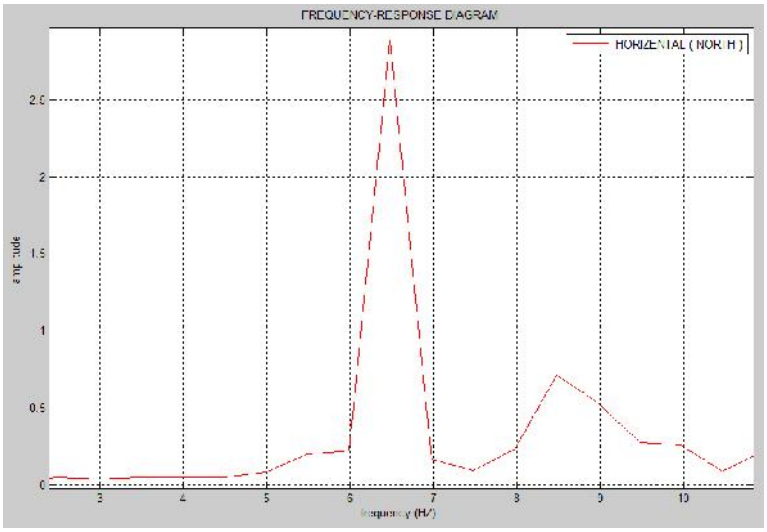
شکل ۵: آزمایش جاروی فرکانسی پی در جهت شمال–جنوب



شکل ۶: شناسایی محدوده تشدید ارتعاشات (رزونانس)



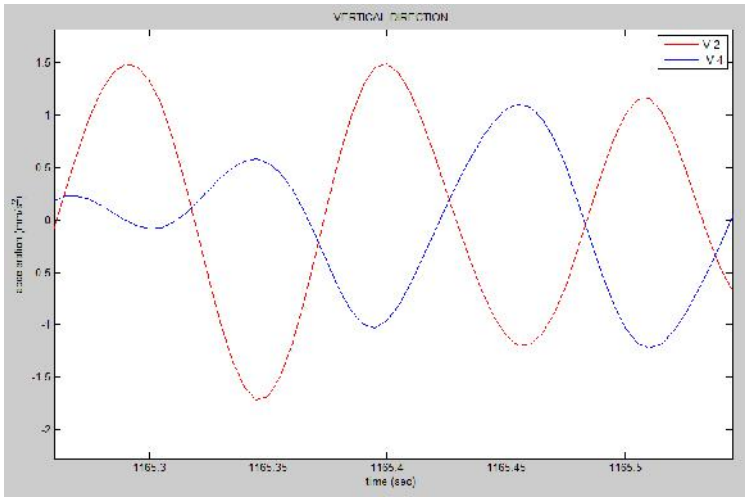
شکل ۷: هم فاز بودن ارتعاشات در مود انتقالی در جهت شمال- جنوب



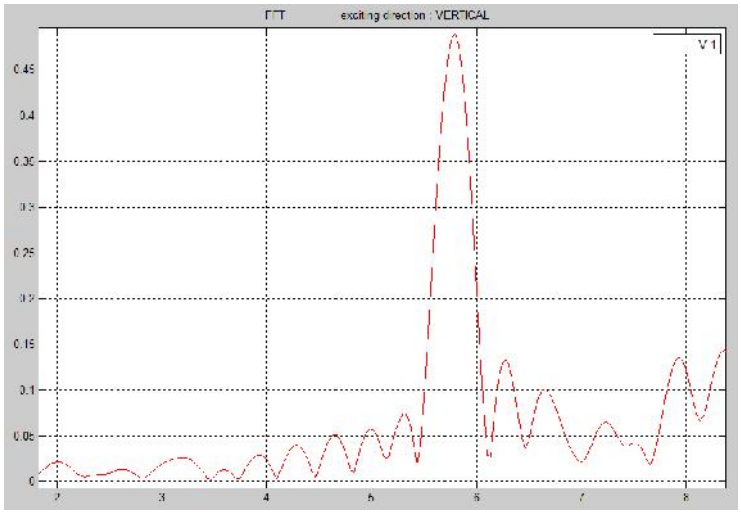
شکل ۸: منحنی پاسخ–فرکانس در محدوده فرکانس تشدید در مود انتقالی شمال- جنوب

مود دورانی (مود راکینگ) پی

برای تعیین این مود ارتعاشی از ارتعاشات قائم و غیر هم فاز سنسورها استفاده شده است. نمونه ای از این ارتعاشات و پردازش انها در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹: ارتعاشات غیر هم فاز سنسورهای قائم در مود راکینگ



شکل ۱۰: منحنی پاسخ –فرکانس در محدوده فرکانس تشدید در مود دورانی راکینگ

جمع بندی و نتیجه‌گیری

با جمع‌بندی نتایج ارائه شده در بخشهای قبلی خلاصه ای از مقادیر فرکانسهای اصلی ارتعاشی و همچنین مقادیر میرایی متناظر انها به شرح جدول ۲ می باشد. همانطور که مطاحظه می گردد مود اصلی ارتعاش پی مورد نظر در دو جهت انتقالی شمالی و شرقی به ترتیب ۶.۴۸ و ۶.۰۰ هرتز و در جهت انتقالی قائم ۷.۵۰ هرتز می باشد. همچنین فرکانس مود دورانی (راکینگ) پی مورد نظر ۵.۶ هرتز حاصل شده است که نسبت به فرکانسهای انتقالی کوچکتر می باشد. همچنین، مقادیر میرایی پی مورد نظر در مدهای مختلف بین ۲.۵۰ الی ۳.۷۰ درصد حاصل شده است. بدیهی است که این مقادیر برای ارتعاشات کم دامنه و در محدوده ارتعاشات ارتجاعی صادق می باشد.

جدول ۲: فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی در هر مود

نوع مود	جهت مود	شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)	نسبت میرایی٪
انتقالی	افقی (شمال– جنوب)	اول	۶.۴۸	۲.۴۴
انتقالی	افقی (شرق– غرب)	اول	۶.۰۰	۳.۷۱
انتقالی	قائم	اول	۷.۵۰	۲.۸۰
دورانی (راکینگ)	حول محورهای افقی	اول	۵.۶	۲.۹۰

مراجع

بهنام‌فر ف، سوگی مورا ی (۱۳۷۷) تحلیل دینامیکی سازه‌های باپی سطحی یا مدفون تحت اثر زمین‌لرزه متغیر در مکان و اثر سازه‌های مجاور، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شماره ۲

حسین زاده ن (۱۳۸۱) *مطالعه تجربی اثرات اندرکنش خاک – سازه در پاسخ لرزه ای ساختمانهای منفرد و مجاور هم روی میز لرزان . رساله دکتری مهندسی عمران – زلزله ، به راهنمایی فریبرز ناطقی الهی، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله*

رعیت رکن‌ابادی ا (۱۳۸۸) مطالعه تجربی-تحلیلی اثرات اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه های متداول با پی های سطحی و مدفون، *رساله کارشناسی ارشد عمران – زلزله، به راهنمایی حسین‌زاده ن، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*

گتمیری ب و سید حائری م (۱۳۷۵) راهنمای تحلیل بر هم کنش دینامیکی خاک– سازه و اثرات آن بر واکنش دینامیکی سازه، *بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (مرکز مطالعات مقابله با سوانح طبیعی ایران)، ویرایش چاپ اول*

Chen et al. (1979) Comparison of Soil-Structure Interaction by Different Ground Models. *SMIRT-5, Vol K(a)*

Hall JR and Kissenpfenning JF (1976) Special Topics on Soil-Structure Interaction. *International Journal of Nuclear Engineering and Design*, vol 38,PP273-287

Meymand PT(1998) Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile Superstructure-Interaction in Soft Clay, Ph.D. Dissertation, Univ. of California

Rea D et al., Dynamic Analysis of Electrodynamics shaking tables, UCB/EER- 77-29

Rinawi A and Clough R, shaking table- Structure Interaction, *UCB/EERC-91-13*

Seed HB and Lysmer J (1987) SSI Analysis by Finite Elements- State-of-the-art, *International Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol 46, 1978,PP349-365*