

Investigation and role of seismic table in dynamic analysis of structural parts

Mahdi Koushamesh *

M.Sc. Student, Jihad University, Hamadan, Iran

بررسی و نقش استفاده از میز لرزه در تحلیل دینامیکی قطعات سازه ای

مهدی کوشامنش *

دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه جهاد دانشگاهی، همدان، ایران

*Corresponding author's email address:

koushameshm@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰

How to cite this article:

Mahdi Koushamesh, Investigation and role of seismic table in dynamic analysis of structural parts, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2023, 8(1):9-16.

ارجاع به مقاله:

مهدی کوشامنش، بررسی و نقش میز لرزه در تحلیل دینامیکی قطعات سازه ای، *مهندسی و مدیریت ساخت*، ۱۴۰۲، ۸ (۱): ۹-۱۶.

Abstract

The interaction of the foundation of the seismic table with the soil is effective on its functional accuracy and it affects the accuracy of the results of the tests on the table. To identify this behavior, it is necessary to know the dynamic parameters of this vibration system, and in this regard, the use of experimental studies has been recognized as a suitable solution. By using this method, the uncertainties in the performance of the seismic table are reduced due to the interactions mentioned in this vibration system during operation. In this research, a forced vibration test was carried out on the 6 degrees of freedom shaking table of the International Institute of In this test, data collection of the vibrations transmitted to the surrounding environment of the foundation was also done, and using the results, how the vibrations were transmitted from the table to the surrounding environment was evaluated. Also, the data recorded on the foundation was used to identify the dynamic parameters of the soil system and foundation has been used, based on the results of this research, the range of vibrations transmitted from the foundation to the surrounding environment decreases rapidly with increasing distance from the edge of the foundation.

Keywords

Earthquake desk, international earthquake research institute, acceleration mapping, frequency, numerical modeling, horizontal and vertical vibration

چکیده

اندرکنش پی میز لرزه با خاک بر دقت عملکردی آن موثر بوده و در صحت نتایج آزمایش ها بر روی میز تاثیرگذار است برای شناسایی این رفتار دانستن پارامترهای دینامیکی این سیستم ارتعاشی لازم بوده و در این راستا استفاده از مطالعات تجربی یک راهکار مناسب تشخیص داده شده است با استفاده از این روش عدم قطعیت های موجود در عملکرد میز لرزه به سبب وجود اندرکنش های گفته شده در این سیستم ارتعاشی در حین بهره برداری کاهش می یابد. در این تحقیق به شرح یک آزمایش ارتعاش اجباری انجام شده بر روی میز لرزان ۶ درجه آزادی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله اقدام گردیده است. در این آزمایش داده برداری از ارتعاشات انتقال یافته به محیط اطراف پی نیز صورت پذیرفته و با استفاده از نتایج حاصل از آن چگونگی انتقال ارتعاشات از میز به محیط مجاور ارزیابی گردیده است همچنین از داده های ثبت شده روی پی برای شناسایی پارامترهای دینامیکی سیستم خاک و پی استفاده شده است بر مبنای نتایج این تحقیق دامنه ارتعاشات انتقال یافته از پی به محیط اطراف با افزایش فاصله از لبه پی به سرعت کاهش می یابد.

کلمات کلیدی

میز لرزه، پژوهشگاه بین المللی زلزله، شتاب نگاشت، فرکانس، مدل سازی عددی، ارتعاش افقی و قائم

زمین به میز و ساختمان واقع بر روی آن وارد می کنند این میزها امکان مشاهده رفتار دینامیکی سازه را برای محققین فراهم می کنند مهم این است که تکان های میز زلزله به نحوی باشد که حرکات زمین را در طول یک زلزله واقعی مشابه سازی کند در آزمایش مورخ ماه جولای ۲۰۰۹ قرار بر این بود که رفتار و میزان مقاومت ساختمان چوبی بررسی شود. اینکه در چه زمان و تحت چه زلزله ای فرو می ریزد؟ این آزمایش بزرگترین آزمایش بر روی یک ساختمان چوبی

۱- مقدمه

میز زلزله چیست؟

اصطلاح میز زلزله در مراکز تحقیقاتی مرتبط با زلزله و سازه به میز هایی گفته می شود که امکان بنا کردن یک ساختمان در مقیاس واقعی بر روی میز زلزله وجود داشته و در زیر صفحه اصلی میز زلزله جک های هیدرولیکی قرار دارد که لرزش هایی مشابه لرزش های



8 (1), 2023

دوره ۸، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۲

دوفصلنامه پژوهشی



بود. مرکز E-Defence در مجاورت شهر کوبه واقع شده و مرکزی است که بزرگترین میز زلزله ای دنیا در آن واقع شده و این امکان را برای محققین فراهم کرده تا بتوانند ساختمانهای عظیمی را بر روی آن بنا کرده و سپس رفتار سازه ها را در طول زلزله بررسی کنند نکته مهم این است که این میز امکان لرزش در سه جهت X,Y,Z دارا بوده و در ضمن ظرفیت جک های هیدرولیکی که نصب شده به حدی است که می توان ساختمان های مرتفع با و با وزن زیاد را هم روی آن بنا کرد. ساخت این میز ۷ سال طول کشیده (از ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۵) و مرکز E-Defence در مجاورت شهر کوبه واقع شده و مرکزی است که بزرگترین میز زلزله ای دنیا در آن واقع شده و این امکان را برای محققین فراهم کرده تا بتوانند ساختمانهای عظیمی را بر روی آن بنا کرده و سپس رفتار سازه ها را در طول زلزله بررسی کنند نکته مهم این است که این میز امکان لرزش در سه جهت X,Y,Z دارا بوده و در ضمن ظرفیت جک های هیدرولیکی که نصب شده به حدی است که می توان ساختمان های مرتفع با و با وزن زیاد را هم روی آن بنا کرد. ساخت این میز ۷ سال طول کشیده (از ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۵) و تاریخچه احداث آن بدین شرح است که بعد از زلزله ۱۹۹۵ کوبه تحقیقات ژاپنی ها در زمینه زلزله شدت و گستردگی بیشتری پیدا می کند و لذا دولت یک بودجه ویژه به آژانس علوم و فناوری (STA: science and Technology Agency) می دهد تا این میز لرزه ای با ابعاد قابل توجه انواع سازه ها بنا نماید. طی چند سال اخیر رفتار نمونه های متعددی از سازه ها بر روی این میز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نحوه کار و طراحی میز زلزله

مراحل کار به این شکل است که طی 3 نوبت و به صورت حساب شده توسط جک های میز زلزله لرزش تولید می شود و سپس وضعیت در دیوار اتاق های مختلف ساختمان بعد از هر زلزله مورد بازرسی و کنترل دقیق گروه برگزارکننده آزمون قرار می گیرد سه مرحله به این شکل برنامه ریزی شده که در مرحله اول زلزله ای با بزرگای ۶۰٪ زلزله نورتریج و در مرحله دوم با زلزله ای که بزرگای آن ۱۲۰٪ نورتریج بود میز به لرزه درآمد در آخرین مرحله نیز ساختمان با زلزله ای معادل ۱۸۰٪ زلزله نورتریج به لرزش درآمد.

ثبت رویداد زلزله آزمایشی

دوربین های فیلمبرداری متعددی که در پیرامون سازه نصب شده اند بسیار جلب توجه می کند تعداد این دوربین ها نشانی است از وسواس های لازم در امر ثبت رفتار سازه در طول زلزله نکته بسیار جالب در این پروژه تحقیقاتی نتیجه آزمایش بود در سومین مرحله لرزش نهایی که به ساختمان وارد شد قبل از اعمال لرزه زنگ ایمنی به صدا در آمد تا همه از اطراف ساختمان به سکوی ایمنی بروند صدای شمارش معکوس از بلندگو ها شنیده شد و میز آخرین بار هم لرزید با زلزله ای تقریباً دو برابر زلزله نورتریج تمام تکان های میز زلزله نتوانست ساختمان را فرو ریزد و پس از اتمام لرزه هایی که در مراحل مختلف پیش بینی شده بود ساختمان برپا باقی ماند. آخرین نکته ای که باید در این بحث با آن اشاره شود گران بودن فوق العاده زیاد انجام این نمونه آزمایش هاست در واقع ذهنیت اولیه بسیاری این است که بخش اصلی بودجه مورد نیاز انجام چنین آزمایش هایی صرف

(ساختن و تخریب ساختمان) روی میز می شود و حال آنکه چنین چیزی صحیح نیست بخش عمده بودجه مورد نیاز چنین آزمایش هایی صرف آنالیز اطلاعات به دست آمده از لرزش میز زلزله می شود. در واقع گروه بزرگی از محققین باید مراحل ساخت سازه بر روی میز و اعمال زلزله به آن را طراحی نموده و کار اصلی آنها پس از لرزش میز آغاز می شود آنالیز اطلاعات به دست آمده پروسه ای بسیار زمانبر و هزینه بر است.

با توجه به زلزله خیز بودن کشورمان و خسارات زیادی که ناشی از زلزله تا به حال ایجاد شده و نیاز روز افزون به مطالعات آزمایشگاهی در زمینه مهندسی زلزله و پاسخ دینامیکی سازه ها تاسیس آزمایشگاه میز لرزان از سال ۱۳۷۷ در پژوهشگاه بین المللی زلزله و مهندسی زلزله قوت گرفت براین اساس مطالعات اولیه مربوط به مشخصات میز لرزان و قابلیت های مورد نظر به عمل آمده با توجه به امکانات موجود و مشخصات فنی مورد نیاز تجهیزات میز لرزان و دیگر لوازم مورد نیاز در سال ۱۳۸۱ تهیه گردید که قابلیت انجام آزمایش های دینامیکی را برای انواع مدل های سازه تا حداکثر وزن ۶۰ تن را دارا می باشد. این میز در نوع خود بزرگترین میز لرزان در منطقه خاورمیانه محسوب می شود که برای ارزیابی تجربی و مطالعه ایمنی عملکرد اجزای بزرگ و زیر مجموعه آنها تحت اثر ارتعاشات مختلف نظیر زلزله طراحی شده است از آنجایی که عملکرد مطلوب سازه های ساختمانی و تاسیسات زیربنایی کشور در مناطق لرزه خیز به یکی از موضوعات مهم در سال های اخیر تبدیل شده است لذا برای مطالعه و ارزیابی تجربی اینگونه ساختمان ها و تاسیسات اعم از زیر بنایی - بتنی - فولادی - صنعتی و غیره راه اندازی میز لرزان چند مولفه ای به عنوان یک سیستم آزمایشگاهی مجهز و پیشرفته بیش از پیش ضروری می باشد.

از کاربردهای مهم میز لرزان بررسی ارتعاشات ایجاد شده توسط میز لرزه به محیط اطراف و لبه های فونداسیون ساخته شده می باشد با توجه به حرکت رفت و برگشتی نیروی زلزله و پس لرزه های مخرب آن و ضرورت شناخت و بررسی دقیق این نیروی مخرب و ساخت و سازهای مقاوم در برابر آن عملاً در شهرها با توجه به بافت متراکم آنها که ساختمان ها در مجاورت یکدیگر ساخته می شوند امکان نصب شتاب نگاشت ها بر روی لبه های فونداسیون و خاک زیر پی این ساختمان ها جهت بررسی ارتعاشات نیروی زلزله به محیط پیرامونی و لبه های فونداسیون و خاک زیر پی ساختمان های اطراف وجود ندارد و تخمین خرابی های ناشی از نیروی زلزله در اثر حرکت زمین که منجر به انتقال نیروی زلزله به ساختمانهای مجاور خصوصاً خاک زیر پی آنها می شود قابل بررسی نیست. ضرورت انجام این تحقیقات در محیط های آزمایشگاهی توسط میز های لرزان انجام و ثبت شده است. طبق نتایج به دست آمده از میزهای لرزان در محیط آزمایشگاه دامنه ارتعاشات انتقال یافته از پی به محیط اطراف با افزایش فاصله از لبه پی به سرعت کاهش می یابد که باعث می شود با خیال آسوده تری در زمان ساخت فونداسیون ساختمان ها در مجاورت یکدیگر بدون ایجاد درز انقطاع اجرا شود و همچنین کاهش دامنه ارتعاشات انتقالی در خصوص ارتعاشات افقی و قائم دارای روند یکسانی نیست طبق مطالعات و آزمایش های به عمل آمده از میزهای لرزان ارتعاشات قائم در عمل متأثر از بازتاب امواج درون خاک می باشد و همچنین



8 (1), 2023

دوره ۸، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۲

دوفصلنامه پژوهشی

مهندسی و مدیریت ساخت

دقت عملکرد میز لرزه به دانستن مشخصه های اندرکنش پی این سیستم ارتعاشی با خاک وابسته است.

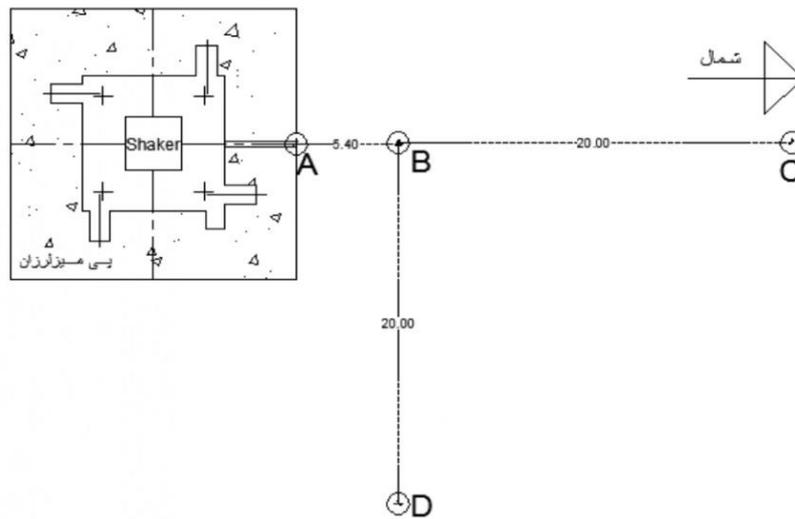
معرفی میز لرزان و ابزارگذاری آن

پی میز لرزه شش درجه آزادی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله با ابعاد ۱۵*۱۵ متر و ارتفاع ۹ متر دارای وزنی بیشتر از ۴۰۰۰ تن است. این میز لرزان دارای ۴ جک افقی و ۴ جک قائم است که جک های قائم آن علاوه بر تحمل وزن عرشه و نمونه مستقر بر آن بایستی بتواند اثرات بارهای دینامیکی ناشی از حرکات افقی، قائم و دورانی میز را با حفظ موقعیت حرکتی تعیین شده در شتاب نگاشت های وارده به میز تحمل نمایند. برآیند نیروهای حاصل از عکس العمل جک ها از طریق پی به خاک انتقال می یابد. نحوه عملکرد میز و همچنین اثرات آن بروی ساختمان های مجاور به میزان و چگونگی انتقال ارتعاشات ناشی از حرکت میز به خاک وابسته است.

در این ارتباط تعیین خصوصیات دینامیکی خاک از پارامترهای مهم در این مطالعات است.

در این تحقیق آزمایش ارتعاش اجباری با رژیم بارگذاری جاروی فرکانسی برای تعیین خصوصیات خاک و بررسی دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات انتقالی به خاک در فواصل مختلف از میز بکار گرفته شده است. در این آزمایش یک دستگاه لرزاننده در مرکز پی نصب گردیده و ثبت ارتعاشات توسط شتاب نگارهایی بادقت بالا و در فواصل معین از مرکز پی صورت پذیرفته است. لرزاننده مورد استفاده قابلیت ایجاد ارتعاشات در جهت افقی و قائم را در دامنه ها و فرکانس های مختلف بصورت مجزا دارا می باشد. شکل ۱ موقعیت قرارگیری لرزاننده و شتاب نگارها را نسبت به پی میز لرزه نشان می دهد.

سیستم جمع آوری و ثبت اطلاعات ارتعاشی به کار گرفته شده در آزمایش از نوع ۲۴ بیتی با ۱۲ کانال مستقل بوده و امکان برداشت ۲۰۰ نمونه با قدرت تفکیک بالا را در ثانیه دارا می باشد.



شکل ۱ موقعیت هندسی قرارگیری لرزاننده و شتاب نگارها



شکل ۳ شتاب نگارهای نصب شده بر روی پی میز لرزه



شکل ۲ دستگاه لرزاننده نصب شده بر روی پی میز لرزه

۲- آزمایش ارتعاش اجباری

پس از نصب شتاب‌نگارها در جهات شرقی و غربی نشان داده شده در شکل ۱ و آماده‌سازی دستگاه لرزاننده آزمایش ارتعاش اجباری بر مبنای محدودیت نیرویی سیستم تحریک انجام گرفت. از آنجایی که دامنه تحریک میز لرزان معمولاً در محدوده ۰/۱ هرتز تا ۳۵ هرتز برای موارد استاندارد آزمایشات لرزه‌ای قرار دارد و با توجه به محدودیت‌های به وجود آمده در ایجاد فرکانس‌های بالا برای سیستم لرزاننده در حین کار، انجام آزمایش به طریق جاروی فرکانسی در محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۲۰ هرتز با افزایش پلکانی ۰/۲ هرتز در این پروژه صورت پذیرفت.

در هر پلکان فرکانسی لرزاننده به مدت ۲۰ ثانیه با فرکانس تعیین شده به اعمال تحریک در یکی از جهات افقی و یا قائم پرداخته و پس از آن افزایش فرکانس در پله بعدی به سیستم اعمال گردیده است. مدت زمان ۲۰ ثانیه از آن جهت انتخاب شده است که با توجه به فرکانس تحریک. دامنه پاسخ ارتعاشی سیستم پس از افزایش فرکانس بارگذاری در هر پلکان به حالت مانا مجانب گردد و اثرات گذرای تغییر در فرکانس تحریک میرا شود. میزان زاویه انحراف محور جرم دستگاه لرزاننده α تا فرکانس ۱۵ هرتز ثابت فرض شده است و از فرکانس ۱۵ به بعد این زاویه کاهش یافته تا دامنه نیروی اعمالی از

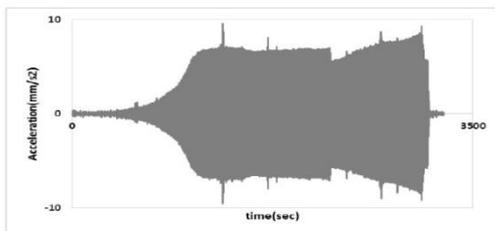
محدوده حداکثر ظرفیت نیرویی لرزاننده متجاوز نگردد بدین طریق در فرکانس‌های تحریک ۰.۱ تا ۱۵ هرتز α برابر با حداکثر میزان آن معادل با ۵۵ درجه بوده ولی در فرکانس‌های تحریک بالاتر این میزان معادل با ۴۰ درجه انتخاب شده است.

آزمایش در عمل سه بار تکرار شده است علت تکرار آزمایش ابرادات دستگاهی سیستم لرزاننده بوده است. در نهایت بعد از کالیبره کردن سیستم تحریک ارتعاش در محدوده دقت دستگاهی مورد نیاز داده برداری نهایی انجام پذیرفته است. پس از پایان کار در هر یک از آرایش‌های شتاب‌نگارهای نصب شده با تغییر در جهت شتاب‌نگاری (از عرضی به طولی و یا از افقی به قائم) به تکرار آزمایش در موقعیت جدید شتاب‌نگارها پرداخته شده است. سپس همین شیوه برای سایر موقعیت‌های تحریک محور لرزاننده بکار گرفته شده است. جدول ۱ مشخصه‌های آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

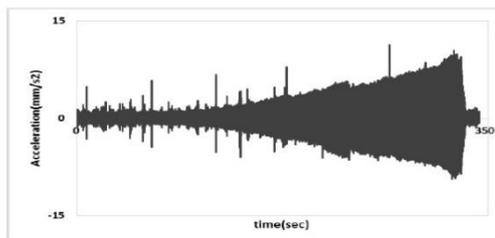
اطلاعات حاصل از انجام آزمایش در سیستم ثبت اطلاعات مربوطه ذخیره شده و پس از اعمال ضرایب کالیبراسیون هر شتاب‌نگار به شتاب‌نگاشت حاصله از آن و استفاده از فیلترهای لازم برای حذف نوفه و اصلاحات مرتبط با آن، اطلاعات پالایش یافته برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار داده شده است. اشکال ۵ تا ۷ نمونه‌هایی از اطلاعات بدست‌آمده از انجام آزمایش را نشان می‌دهند (گام زمانی ثبت شتاب برابر ۰/۰۰۵ ثانیه است).

جدول ۱ مشخصه‌های آزمایش‌ها روی پی میز لرزان

شماره آزمایش	محور نصب لرزاننده	جهت نصب شتاب‌نگارها			گام پلکانی تحریک (هرتز)	α (درجه)	
		شمالی-جنوبی	شرقی-غربی	قائم		(۱۵-۰)	(۲۰-۱۵)
۱	شرقی-غربی	شمالی-جنوبی	شرقی-غربی	قائم	۰.۲	۵۵	۴۰
۲	شمالی-جنوبی	شمالی-جنوبی	شرقی-غربی	قائم	۰.۲	۵۵	۴۰
۳	قائم	شمالی-جنوبی	شرقی-غربی	قائم	۰.۲	۵۵	۴۰



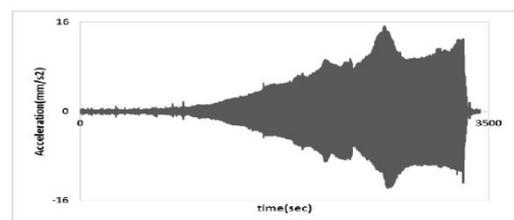
شکل ۶ شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه A بر اثر تحریک افقی



شکل ۷ شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه B بر اثر تحریک قائم



شکل ۸ سیستم جمع آوری و ثبت اطلاعات بکار گرفته شده در آزمایش Data logger



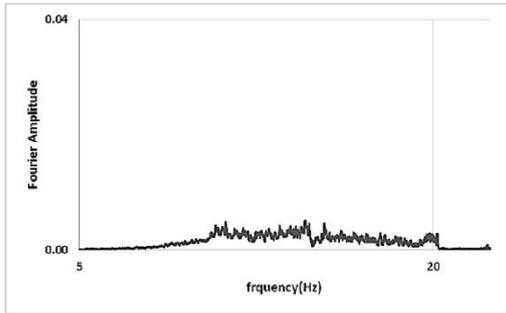
شکل ۵ شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه A بر اثر تحریک قائم

۳- تحلیل داده‌های شتاب‌نگاری

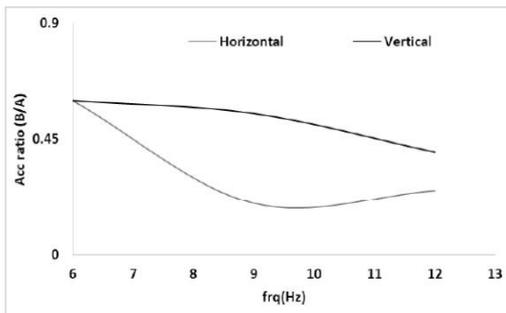
شکل ۸ نمونه ای از محتوای فرکانسی شتاب ثبت شده در لبه پی (ایستگاه A) و محیط اطراف آن (ایستگاه B) را در جهات افقی و قائم نشان می‌دهند. با توجه به این نتایج و همچنین نتایج شتاب‌نگاری نشان داده شده در اشکال ۵ تا ۷ مشخص می‌گردد که دامنه و فرکانس پاسخ در روی پی (ایستگاه A) با نقاط خارج از پی (ایستگاه B) متفاوت بوده و با فاصله گرفتن از لبه پی دامنه شتاب‌های ثبت شده در تمامی فرکانس‌ها (خصوصاً تحریک افقی) کاهش یافته است. اشکال ۹ و ۱۰ نشان‌دهنده نسبت پاسخ شتاب‌های ثبت شده بر روی خاک مجاور پی در فواصل ۵/۴ و ۲۵/۴ متری (به ترتیب ایستگاه‌های B و C) به شتاب اندازه‌گیری شده در روی لبه پی (ایستگاه A) بر حسب فرکانس‌های مختلف تحریک (نشان داده شده بر روی محور افقی) می‌باشند. همان‌گونه که در این اشکال نشان داده شده است با فاصله گرفتن از لبه پی در ارتعاش افقی دامنه پاسخ شتاب ثبت شده در فرکانس‌های مختلف تحریک کاهش بسیاری یافته ولی این کاهش در ارتعاش قائم با روند متفاوتی صورت پذیرفته است. این تغییر در دامنه ارتعاشات در عمل متأثر از بازتاب امواج درون خاک در فواصل مختلف نیز بوده است که به ایستگاه آخر داده برداری رسیده است. این نتایج همچنین حاکی از آن است که دامنه شتاب انتقالی در فرکانس‌های بالای تحریک با افزایش فاصله از مرکز تحریک با سرعت بیشتری نسبت به فرکانس‌های پایین کاهش می‌یابد.

ارتعاشات در عمل متأثر از بازتاب امواج درون خاک در فواصل مختلف نیز بوده است که به ایستگاه آخر داده برداری رسیده است. این نتایج همچنین حاکی از آن است که دامنه شتاب انتقالی در فرکانس‌های بالای تحریک با افزایش فاصله از مرکز تحریک با سرعت بیشتری نسبت به فرکانس‌های پایین کاهش می‌یابد. بدین ترتیب داده‌های ثبت شده شتاب در آزمایش ارتعاش اجباری در دو راستای افقی و قائم مقادیر تغییرمکان حداکثر پی و متعاقب آن سختی و نسبت میرایی خاک قابل استخراج خواهد بود.

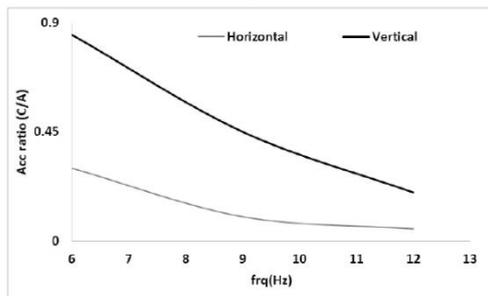
در این روش ابتدا با تخمین فرکانس طبیعی ارتعاشی پی در جهات افقی و قائم از طریق یافتن مقادیر حداکثر شتاب اندازه‌گیری شده از میان تمامی فرکانس‌ها مختلف تحریک به استخراج مقادیر اولیه سختی و میرایی فرکانس میرای خاک در هر فرکانس اقدام شده و سپس با سعی و خطا به همگرایی نتایج برای تمامی فرکانس‌ها اقدام می‌گردد. شکل ۱۱ تغییرات شتاب حداکثر ثبت شده در محل دستگاه‌گذاری واقع بر روی پی (ایستگاه A) را با استفاده از دو راستای افقی و قائم نشان می‌دهد براساس نتایج به دست آمده مشخص می‌گردد که بیشترین شتاب ثبت شده بر روی پی در ارتعاش افقی در فرکانس حدود ۹ هرتز و در ارتعاش قائم در مجاورت ۱۲ هرتز اتفاق افتاده است. این دو فرکانس، می‌توانند فرکانس‌های طبیعی اولیه پی در دو جهت افقی و قائم برای تعیین مشخصه‌های دینامیکی پی در مرحله بعدی محسوب شوند.



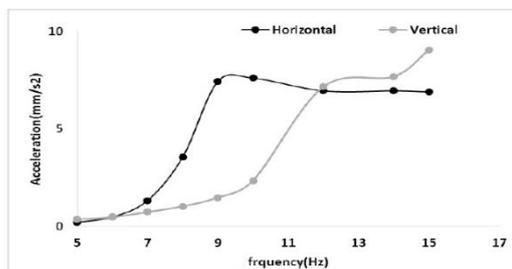
شکل ۸ محتوای فرکانسی شتاب نگاشت ثبت شده در ایستگاه B بر اثر تحریک افقی



شکل ۹ تغییرات در پاسخ شتاب ثبت شده در فاصله ۵.۴ متری از لبه پی



شکل ۱۰ تغییرات در پاسخ شتاب ثبت شده در فاصله ۲۵.۴ متری از لبه پی



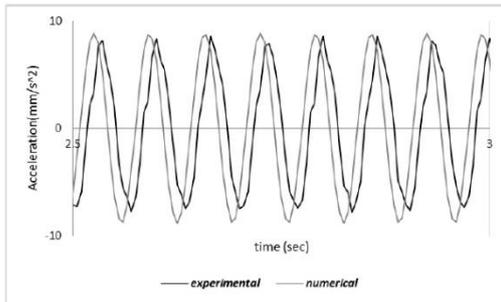
شکل ۱۱ شتاب حداکثر ثبت شده در روی پی بر حسب فرکانس تحریک در ایستگاه A تحت اثر ارتعاش افقی و قائم

جدول ۲ مشخصات دینامیکی سیستم خاک - پی با استفاده از مدل سازه یک درجه آزاد

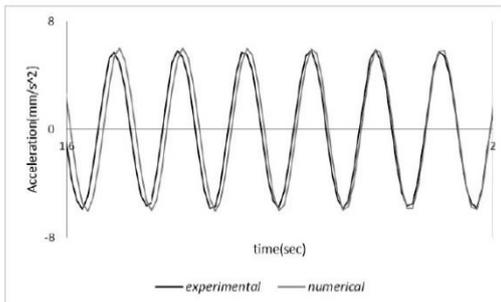
ارتعاش	نسبت میرایی (درصد)	سختی (نیوتن میلی‌متر)	فرکانس طبیعی (هرتز)
افقی	۱۰	۱.۴×۱۰^۲	۹.۴
قائم	۲۰	۲.۴۷×۱۰^۲	۱۲.۱

۴- صحت سنجی مدل عددی

از نتایج تاریخچه زمانی حاصل شده در آزمایشات تجربی برای اعتبارسنجی مدل یک درجه آزادی بکار رفته استفاده شده است. در این بخش از مشخصه‌های دینامیکی به دست آمده برای پی در مرحله قبل استفاده شده است. بایستی توجه داشت که چون بارگذاری بر روی پی تقریباً در مرکز پی اتفاق افتاده است. فرض پی به عنوان یک سیستم یک درجه آزاد تحت بارگذاری هارمونیک قابل قبول تلقی گردیده است شکل های ۱۲ و ۱۳ مقایسه نتایج تاریخچه زمانی شتاب پی حاصل از مدل عددی را با داده‌های ثبت شده از آزمایش در دوراستای افقی و قائم (برای فرکانس‌های تحریک مختلف) را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲ مقایسه شتاب پی در آزمایش تجربی با مدل سازی عددی در ارتعاش قائم در فرکانس ۱۵ هرتز



شکل ۱۳ مقایسه شتاب پی در آزمایش تجربی با مدل سازی عددی در ارتعاش افقی در فرکانس ۱۶.۵ هرتز

نتایج نشان داده شده حاکی از تطابق نسبی اطلاعات حاصل از مدل عددی با نتایج به دست آمده از آزمایش دارد. بایستی توجه داشت که شتاب‌های ثبت آزمایش در عمل حاصل از عبور امواج ارتعاشی از لایه‌های مختلف خاک و برخورد با پی‌ها هستند و این امر می‌تواند سبب ایجاد اختلاف ما بین نتایج عددی و تجربی شده در شکل ۱۵ اختلاف ما بین دو منحنی عمدتاً نشانگر شیفت زمانی دو منحنی است که در سیکل‌های مختلف ثابت باقی مانده است. با این وجود می‌توان با دقت در منحنی نتایج شتاب ثبت شده به عدم تقارن کامل دامنه‌ها در مقادیر مثبت و منفی که مبین وجود فرکانس‌های بالاتر در پاسخ مانای سیستم واقعی است پی برد. البته این مسأله در منحنی به دست آمده از مدل‌سازی عددی مشاهده نمی‌گردد. اما در شکل ۱۶ اختلاف مشاهده شده ناشی از تفاوت جزئی در فرکانس حالت مانا در سیستم واقعی نسبت به مدل عددی است که در فرکانس تحریک نزدیک به فرکانس طبیعی پی رخ داده است. این امر ناشی از روش ایجاد همگرایی جواب‌ها برای تمامی محدوده فرکانس تحریک است که قبلاً توضیح داده شده است. با این وجود اختلاف حاصله در محدوده خطای محاسباتی ۲ درصد است و قابل قبول تشخیص داده می‌شود.

۵- انتقال ارتعاشات از پی به محیط پیرامون

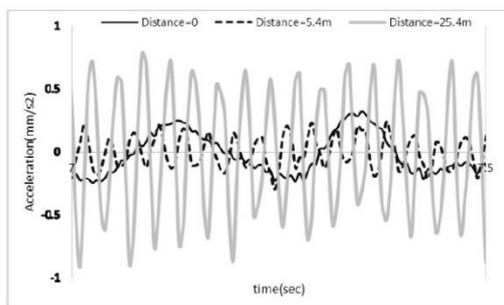
یکی دیگر از اهداف آزمایش تجربی بر روی پی میز لرزان استخراج دامنه ارتعاشات انتقالی به محیط پیرامونی پی بوده است. با استفاده از آزمایش‌های انجام شده دامنه انتقال ارتعاشات افقی و قائم به محیط و نحوه انتشار آنها در محیط مشخص گردیده است اطلاعات به دست آمده از داده‌های ثبت شده از آزمایش نشان دهنده کاهش دامنه ارتعاشات با فاصله گرفتن از میز در هر دو حالت ارتعاش افقی و قائم است. شکل ۱۴ نحوه کاهش دامنه شتاب حداکثر ثبت شده برای تحریک اجباری در فرکانس‌های طبیعی پی (ارائه شده در جدول ۲) در دو حالت افقی و قائم را نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال مشخص می‌گردد که با تحریک پی در فرکانس‌های طبیعی آن برای فاصله ۲۵ متری در جهت افقی و قائم از لبه پی دامنه ارتعاشات به طور متوسط حدود ۷۵ درصد کاهش داشته است. لازم به ذکر است که چون میز لرزه در مجاورت کف قوی با ابعاد ۲۰ در ۳۰ متر به وزن ۴۵۰۰ تن در فاصله افقی ۵ متری از لبه پی میز لرزه و در فاصله قائم ۵ متری بالای کف پی میز لرزه قرار دارد.

این نگرانی وجود داشت که آیا اثرات انعکاس و شکست موج‌های قائم و افقی بر روی سطح زیرین این پی می‌تواند موجب تغییرات ناخواسته در سطح ارتعاش مجاور گردد و یا خیر. اشکال ۱۵ و ۱۶ دامنه پاسخ شتاب انتقالی به سازه‌های ثبت شده در فواصل مختلف از لبه پی را در تحریک اجباری خارج از محدوده فرکانس طبیعی پی (فرکانس ۶/۵ هرتز) بر حسب زمان نشان می‌دهند.

بر اساس اطلاعات موجود در این اشکال می‌توان بیان کرد که دامنه و فرکانس ارتعاش انتقالی به خاک بر حسب فاصله به شدت با یکدیگر متفاوت هستند. این مسأله به گونه‌ای است که در نقاط خارج از پی محتوای فرکانسی ارتعاش انتقالی به سمت فرکانس‌های بالا تمایل پیدا می‌کند و این روند به صورت مستقیم تابع فاصله نیست. دلیل این امر انتشار امواج در خاک و نحوه بازتاب و زمان حرکت هر موج در خاک است که در عمل سبب می‌گردد فرکانس‌های متفاوتی در فواصل مختلف در پاسخ ارتعاشی خاک غالب شوند. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب فرکانسی و دامنه ارتعاشات انتقالی به خاک در فواصل مختلف از پی تغییر می‌یابد و این مسأله می‌بایستی در بررسی ارتعاشات انتقالی به سازه‌های مجاور مد نظر قرار داده شود. این نتیجه از آن جهت دارای اهمیت است که در فاصله ۵/۴ متر از لبه پی میز لرزه. فونداسیون سالن آزمایشگاه قرار دارد که از نظر عملیاتی انتقال ارتعاشات فرکانس بالا به این سازه در عملکرد آن مؤثر بوده و سبب ایجاد محیطی با پس زمینه ارتعاشی ناخواسته در جریان آزمایشات میز لرزه خواهد بود.

اشکال ۱۷ و ۱۸ نیز به همین شیوه مبین چگونگی تغییر در فرکانس ارتعاش انتقالی به خاک در اثر تحریک پی در فرکانسی خارج از فرکانس طبیعی آن است.

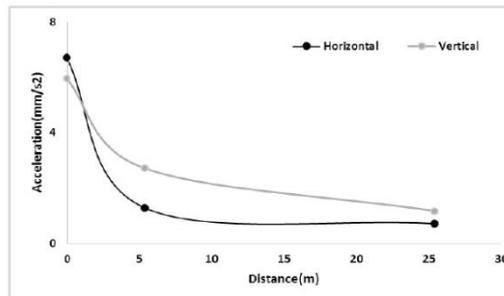
سالن اصلی با توجه به کاربری آزمایشگاهی آن مجموعه مسأله‌ای مهم تلقی گردد.



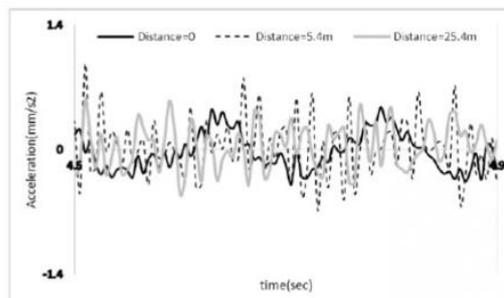
شکل ۱۸ تغییرات دامنه شتاب ثبت شده بر حسب زمان در تحریک افقی ۴.۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی

۶- نتیجه گیری

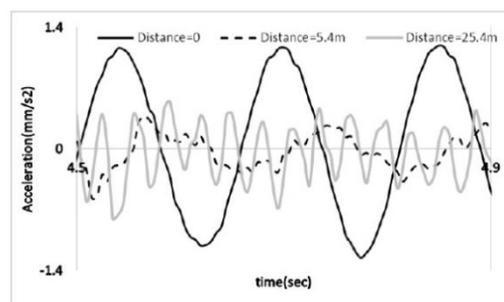
در این نتیجه گیری آزمایش ارتعاش اجباری با رژیم بارگذاری جاری فرکانسی از طریق بکارگیری یک دستگاه لرزاننده ۳۰ کیلو نیوتنی بر روی پی میز لرزان پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله انجام پذیرفته است. لرزاننده در قسمت میانی پی میز لرزان و شتاب‌نگارها در روی پی و در خارج از آن نصب و ثبت دامنه ارتعاشات بر روی پی و در محیط پیرامونی آن صورت گرفته است. از نتایج این آزمایش برای شناسایی خصوصیات دینامیکی پی و بررسی تغییرات پاسخ شتاب در روی زمین و در فواصل معین از لبه پی استفاده شده است با در نظر گرفتن این نکته که تحریک پی توسط لرزاننده مکانیکی مستقر در مرکز جرم آن (بصورت تقریبی) صورت پذیرفته، سیستم پی و خاک متصل به آن به صورت سازه تک درجه آزادی تحت بارگذاری هارمونیک مدل‌سازی شده است. به این ترتیب روابط دینامیکی حاکم بر حرکت جسم تک درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفته و از طریق داده‌های ثبت شده و مدل رفتاری بکار گرفته شده خصوصیات دینامیکی پی (سختی و نسبت میرایی) محاسبه گردیده است. در این روش با استفاده از سعی و خطا به ایجاد همگرایی در نتایج حاصله برای سختی و میرایی پی در فرکانس‌های مختلف پرداخته شده و در نهایت مدل‌ی کاربری در فرکانس‌های مختلف تحریک بدست آورده شده است. در این مطالعات همچنین به بررسی دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات انتقالی در فواصل معین از لبه پی نیز پرداخته شده است. نتایج حاصله حاکی از کاهش قابل ملاحظه در دامنه شتاب مطلق انتقال یافته به زمین بر حسب فاصله در فرکانس تحریک معادل با فرکانس طبیعی پی است. همچنین نشان داده شده است که دامنه پاسخ ارتعاشی پی در سایر فرکانس‌های تحریک تابع مستقیم فرکانس تحریک نبوده و از محتوای فرکانسی بالاتری در فواصل دور از لبه پی. برخوردار است. از آنجا که لرزاننده بکار گرفته شده دارای محدودیت‌های زیادی در دامنه نیرو محل اثر و بازه فرکانسی اعمال نیرو دارد، لازم است تا رفتار دینامیکی پی و اثرات انتقال ارتعاشات حاصله از عملکرد میز به محیط اطراف از طریق مدل‌سازی دقیق‌تر پی میز لرزه و ملحقات آن با درجات آزادی دورانی و انتقالی برای پی صورت پذیرد تا از نتایج آزمایشات تجربی بتوان برای کالیبراسیون مدل‌های عددی اندرکنشی میز لرزه با پی استفاده به عمل آورد.



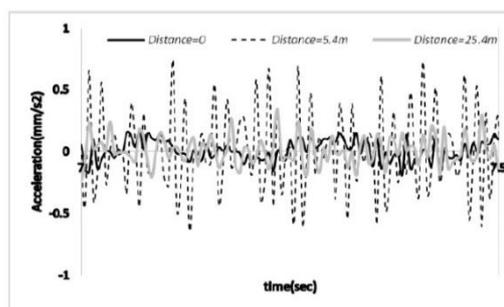
شکل ۱۴ تغییرات دامنه شتاب ثبت شده در تحریک پی در فرکانس‌های طبیعی آن بر حسب فواصل مختلف از لبه پی



شکل ۱۵ تغییرات دامنه شتاب ثبت شده در تحریک قائم ۶.۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی



شکل ۱۶ تغییرات دامنه شتاب ثبت شده بر حسب زمان در تحریک افقی ۶.۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی



شکل ۱۷ تغییرات دامنه شتاب ثبت شده بر حسب زمان در تحریک قائم ۴.۵ هرتز برای فواصل مختلف از لبه پی

در این اشکال فرکانس تحریک در محدوده نصف فرکانس طبیعی افقی پی (۴/۵ هرتز) در هر دو جهت قائم و افقی انتخاب شده است همان گونه که ملاحظه می‌شود در این فرکانس تحریک، شتاب افقی انتقالی در فاصله ۲۵/۴ متری دارای دامنه‌ای قابل توجه در فرکانس بالا است که می‌تواند در ارتباط با انتقال ارتعاش به ساختمان مجاور

۷- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

۸- سهم نویسندگان

نویسندگان به صورت مساوی در نگارش مقاله نقش داشته‌اند.

۹- حمایت مالی

این تحقیق از هیچگونه حمایت مالی‌ای برخوردار نبوده است.

۱۰- مراجع

- [1] The foundation of the NEES/UCSD Shake Table and the surrounding soil: Reaction block response., Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(7), 2011
- [2] B. Soltani, Soil-structure interaction in massive foundations, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2015 (In Persian)
- [3] F. Nabati, Sensitivity analysis of a shaking table subject to interaction with surrounding environment, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2015. (In Persian).
- [4] J.P. Wolf, Dynamic Soil-Structure Interaction, illustrated ed., Prentice Hall, 1988.
- [5] R. W. Clough, J. Penzien, Dynamics of Structures, 2 ed., McGraw-Hill, 1993.



8 (1) , 2023

دوره ۸، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۲

دوفصلنامه پژوهشی



COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)