آزمایش کالیبره کردن نسبی حسگرهای سرعت سنج CMG-6TD بر روی میز لرزان با استفاده از نرم‌افزار SCREAM

محمد داودی، استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه
مصطفی میرجلیلی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه

۱- چکیده

در پروژه‌های اندازه‌گیری ارتعاشات درجا، کالیبره بودن دستگاههای ثبت ارتعاشات اهمیت خاصی دارد. در حال حاضر، ۲۵ دستگاه لرزه‌نگار *CMG-6TD* موجود در پژوهشگاه به دلیل ویژگیهای خاص خود با تناوب بیشتری در طرحهای مختلف استفاده شده‌اند. با توجه به آنکه گذشت زمان می‌تواند ضرایب خروجی دیجیتال دستگاهی را در هرکدام از لرزه-نگارهای مذکور نسبت به مقادیر ارائه شده توسط کارخانه سازنده تغییر دهد، لازم است دستگاههای مذکور برای استفاده در پروژه‌های آتی با یکی از روشهای ممکن مانند کنترل مجدد توسط کارخانه سازنده، استفاده از دستگاه میز لرزان و استفاده از نرم‌افزار *SCREAM* کالیبره گردد. در مقاله حاضر، ضمن بررسی نتایج کالیبره کردن نسبی شش دستگاه *CMG-6TD* که بر روی میز لرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله-شناسی و مهندسی زلزله در محدوده فرکانسی ۰/۲ تا ۳۰ هرتز و به ترتیب در محدوده تغییرمکانهای ۵ الی ۰/۰۰۵ میلیمتر صورت گرفته، نتایج حاصل از تصحیح ضریب خروجی دیجیتال ۱۵ دستگاه دیگر لرزه‌نگار با استفاده از نرم‌افزار *SCREAM* ارائه شده است. بدین منظور، ابتدا نحوه انجام آزمایش کالیبره نمودن شش دستگاه سرعت‌سنج و پنج حسگر شتاب‌سنج، به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حسگرها از نظر دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات میز لرزان در فرکانس‌های ارتعاشی پایین‌تر از ۳۰ هرتز و مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی ثبت شده با آنها شرح داده شده است. نتایج به دست آمده، علاوه بر مشخص نمودن محدودهٔ کاربرد سرعت‌سنجهای *CMG-6TD* تا حداکثر مقدار $\pm$ ۳/۸ *mm/s*، مقادیر ضرایب خروجی دیجیتال کلیه دستگاههای مذکور را برای استفاده در پروژه‌های آتی ارائه می‌دهد. بر اساس این نتایج، اختلاف نسبی در دامنه طیف فوریه حسگرهای مختلف به ۵/۵٪ محدود می‌شود؛ در حالی که هیچ اختلافی در محتوای فرکانسی نگاشتها وجود ندارد.

کلیدواژه‌ها: کالیبره نمودن، سرعت‌سنج *CMG-6TD*، میز لرزان، نرم‌افزار *SCREAM*

۲- مقدمه

حسگرهای سرعت سنج *CMG-6TD* به دلیل مزایا و قابلیتهایی که نسبت به دیگر دستگاههای اندازه‌گیر ارتعاشات موجود در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله دارند، در طرحهای مختلف ثبت ارتعاشات به طور وسیعی استفاده شده‌اند. قابلیت حمل و استقرار آسان، بهره‌برداری راحت، حساسیت زیاد، امکان اتصال به *GPS* و حافظه زیاد دستگاههای مذکور باعث شده است در مطالعات متعدد ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای (شهرها، مراکز مهم و ساختگاههای صنعتی)، ثبت پس‌لرزه‌ها در زمین‌لرزه‌های مختلف، آزمایش ارتعاش محیطی سازه‌های گوناگون، مطالعه دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات بر روی پی‌های خاص و در نهایت در ثبت آرایه‌ای خردلرزه‌ها (به منظور استخراج مقطع سرعت موج برشی در لایه‌های زیرسطحی) مورد استفاده قرار گیرند.

در آزمایشهای مذکور که از چندین دستگاه حسگر *CMG-6TD* پژوهشگاه استفاده شده است، کالیبره بودن دستگاههای مذکور به هنگام انجام آزمایشها از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. با گذشت زمان و کارکرد دستگاهها در شرایط محیطی مختلف، حساسیت دستگاهها به مرور زمان تغییر می‌کنند و بعد از گذشت مدت زمانی، باید مقادیر جدید مشخصات دینامیکی آنها استخراج شوند. کالیبره نمودن حسگرهای مذکور یا به صورت مطلق با دقت زیاد توسط کارخانه سازنده دستگاه، یا با دقت قابل قبول با نرم‌افزار *SCREAM* ۴/۴ و یا به صورت نسبی در محل انجام آزمایش می‌تواند صورت گیرد. در واقع، به دلیل مشکلات کالیبره نمودن مطلق دستگاهها از جمله زمانبر بودن و هزینه زیاد ارسال و دریافت دستگاهها در روش اول و همچنین نیاز به شرایط محیطی مناسب از نظر پایین بودن نوفه محیطی در

روش دوم، آزمایش کالیبره بودن به روش سوم مطرح می‌شود. در کالیبره نمودن مطلق دستگاهها با دقت زیاد توسط کارخانه سازنده، با برآورد صحیح از مقادیر مشخصات دینامیکی تغییر یافته دستگاه، ضرایب تبدیل خروجی دیجیتال[1] مجدداً محاسبه می‌گردد. در کالیبره کردن دستگاهها به کمک نرم‌افزار *SCREAM*، با ارسال موجی با فرکانس و دامنه مشخص توسط نرم‌افزار و با مقایسه پاسخ دستگاه، ضریب تبدیل خروجی دیجیتال با دقت مناسبی محاسبه می‌گردد. در کالیبره نمودن نسبی، کلیهٔ حسگرها در نقطه‌ای از محل انجام آزمایش و یا بر روی دستگاه میز لرزان، در جهات مورد نظر به نحوی نزدیک یکدیگر و با رعایت حداقل فاصله قرار می‌گیرند تا ارتعاشات ورودی به حسگرها تا حد امکان یکسان باشد. سپس، با ثبت همزمان ارتعاشات توسط کلیهٔ حسگرها و با مقایسهٔ نسبی دامنهٔ ارتعاشات و محتوای فرکانسی نگاشتهای حاصل، ضرایب نسبی کالیبره نمودن حسگرها محاسبه می‌گردد.

با توجه به مطالب مذکور و بر اساس تجارب قبلی آزمایش کالیبره‌کردن دستگاههای مختلف لرزه‌نگار و شتابنگار صورت گرفته در پژوهشگاه و در دیگر نقاط دنیا، در تحقیق حاضر سعی گردید تعدادی دستگاه لرزه‌نگار *CMG-6TD* موجود در پژوهشگاه با هدف مشخص نمودن محدوده دامنه ارتعاشات قابل ثبت و تعیین مقادیر ضرایب خروجی دیجیتال دستگاهها با استفاده از دو روش نرم‌افزار *SCREAM* ۴/۴ و دستگاه میز لرزان تحت آزمایش قرار گیرند.

۳- کالیبره نمودن دینامیکی حسگرهای پژوهشگاه در چندین طرح مهم

بر اساس مرور تاریخچه مطالعات صورت‌گرفته در زمینه کالیبره کردن دینامیکی دستگاههای اندازه‌گیر ارتعاشات در محل، چهار روش کلی را می‌توان مشاهده کرد:

روش اول عمدتاً در آزمایش ارتعاش محیطی و اجباری انواع سازه‌ها استفاده می‌شود و کلیه دستگاههای اندازه‌گیر ارتعاشات درکنار یکدیگر در نقطه‌ای از محل آزمایش و در جهات مورد نظر مستقر و به طور همزمان، تاریخچه زمانی ارتعاشات ثبت می‌گردد. با مطالعه دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات، ضرایب نسبی اصلاح دستگاهی به دست می‌آید.

نمونه‌هایی از این روش را می‌توان در مطالعات تریفوناک در سال ۱۹۷۰ در آزمایش ارتعاش محیطی ساختمان ۲۲ طبقهٔ فولادی گاز و برق سان‌دیاگو [۱] و در آزمایش ارتعاش محیطی ساختمان ۳۹ طبقهٔ بانک اتحاد شهر لوس آنجلس [۲]، در مطالعات عبدالغفار و همکاران در سال ۱۹۷۶ در آزمایش ارتعاش محیطی پل معلق وینسنت- توماس [۳]، در مطالعات فاچ در سال ۱۹۷۷ به هنگام آزمایش ارتعاش محیطی بر روی ساختمان ۱۲ طبقهٔ اداره مرکزی شرکت هانی پارسنز [۴]، در مطالعات عبدالغفار و همکاران در سال ۱۹۸۰ در آزمایش ارتعاش اجباری و محیطی سد خاکی سانتافلیسیا در آمریکا [۵] مشاهده کرد. در مورد اخیر، از هشت دستگاه لرزه‌سنج *SS-۱* استفاده شد؛ به طوری که برای کالیبره کردن حسگرها در آزمایش ارتعاش اجباری، ابتدا سد را با فرکانس مشخص توسط دستگاه لرزاننده تحریک کردند و خروجی لرزه‌نگارها را که نزدیک یکدیگر و در جهت مورد نظر مستقر شده بودند به صورت همزمان اندازه گیری نمودند. سپس با اصلاح مناسبی در میرایی دستگاه گیرنده سیگنال[2]، دامنهٔ پاسخ کلیهٔ حسگرها را یکسان کردند. در آزمایش ارتعاش محیطی سد نیز با مقایسهٔ پیک‌های مستقل دامنهٔ فوریه نگاشتی به طول ۱۰ دقیقه، کالیبره نمودن نسبی در کلیهٔ فرکانس‌های مورد نظر انجام شد و اختلاف خروجی حسگرها در هر فرکانس مشخص به دست آمد.

نمونه‌هایی از کالیبره کردن دستگاههای اندازه‌گیر ارتعاشات با روش اول را در داخل کشور می‌توان در مطالعات آقاکوچک و معماری در سال ۱۳۷۲ در آزمایش ارتعاش اجباری و محیطی ساختمان دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف [۶]، در مطالعات سیاری و تیو در سال ۱۳۷۷ در آزمایش ارتعاش اجباری ساختمان پژوهشگاه [۷] و در مطالعات داودی در سال ۱۳۸۲ در آزمایشهای ارتعاش اجباری و محیطی (از جمله انفجارهای مختلف ساختگاه) بر روی سدهای خاکی مارون و مسجد سلیمان [۸] مشاهده کرد. در مورد اخیر به دلیل اینکه در هنگام آزمایشهای ارتعاشی، نگاشتهای حاصل توسط دستگاههای لرزه‌نگار و شتابنگار عمدتاً برای محاسبه پارامترهای مدی و از جمله اشکال مدی بدنه سدها استفاده می‌شد،

1 . Digital Output m/s/count

2 . Signal Conditioner Attenuation

پارامترهای نسبی به دست آمده از آزمایش کالیبره نمودن، جوابگوی اهداف آزمایشها بود؛ بنابراین، لرزه‌نگارهای ۱-*SS* و شتابنگارهای ۱۱-*FBA* به همراه ثبّاتهای ۱-*SSR* در مرکز تاج سدهای مذکور مستقر شده و به طور همزمان، ارتعاشات محیطی، انفجار و یا ارتعاشات اجباری را ثبت کردند. با پردازش نگاشتهای به دست آمده، ضرایب کالیبره کردن نسبی به دست آمده و در پردازش نگاشتهای ثبت‌شده در نقاط مختلف سدها استفاده شد.

در روش دوم که در صورت نیاز به مقادیر مطلق ضرایب دستگاهی استفاده می‌شود، ضرایب کالیبره کردن بدون نیاز به ارسال تجهیزات به کارخانه سازنده (که معمولا با مشکلاتی مانند تحریم و یا هزینه سنگین مواجه است) با استفاده از نرم‌افزارهای مناسب به دست می‌آید. در این روش، دستگاه مورد نظر در نقطه‌ای با حداقل نوفه ممکن مستقر و با ارسال سیگنال مشخصی به دستگاه، پاسخ ثبت می‌شود. نمونه‌ای از این روش را می‌توان در مطالعات یمینی فرد در سال ۱۳۷۸در آزمایش کالیبره نمودن نسبی ۹ دستگاه لرزه‌سنج ۱-*SS* پژوهشگاه با استفاده از یک دستگاه ثبّات ۱-*SSR* و با اعمال پالسی بر سیم‌پیچ کالیبره لرزه‌سنجها مشاهده کرد. در این آزمایش، که در ایستگاه چاران (به دلیل نوفهٔ پایین محل) انجام شد و پاسخ پله‌ای[3] لرزه‌سنجها در حوزهٔ زمان و فرکانس به دست آمد، با مقایسهٔ پاسخ پله‌ای حسگرها با یکدیگر مشخص گردید که تمامی دستگاهها (بجز دو مورد) در محدودهٔ ۰/۲ تا ۱۰ هرتز از پاسخ یکسانی برخوردارند. لازم به ذکر است در این روش، از ثبت نگاشت پیوسته استفاده نشد؛ بلکه با اعمال یک پالس الکتریکی از طرف دستگاه ۱-*SSR* بر سیم‌پیچ حسگر ۱-*SS*، پاسخ آن به این تحریک و ارتعاش آزاد پس از آن ثبت گردید [۹].

در روش سوم که در دستگاههای شتابنگار و با استفاده از شتاب ثقل انجام می‌شود، ضرایب کالیبره نمودن به دست می‌آید. نمونه‌ای از این روش را می‌توان در مطالعات آشتیانی و همکاران در سال ۱۳۷۷ در آزمایش دینامیکی مدل ۱:۲ ساختمان چهار طبقه مشاهده کرد؛ به طوری که برای کالیبره نمودن شتاب‌سنجهای ۱۱-*FBA*، هر کدام از آنها به صورت عمودی قرار داده شد و با قرائت اختلاف پتانسیل دو سر شتاب‌سنجها که باید در حدود ۲/۵ ولت و متناظر با شتاب g ۱ بود، مقادیر قرائت شده به عنوان مقادیر اولیه به نرم‌افزار ۱۰۰-*OASIS* معرفی شد [۱۰].

در روش چهارم که در کلیه دستگاههای اندازه‌گیر ارتعاشات و به شرط دسترسی به دستگاه میز لرزان امکانپذیر است، علاوه بر مشخص شدن مقادیر کالیبره نمودن در هر فرکانس و تغییر مکان مورد نظر، محدوده کارکرد حسگرها نیز به دست می‌آید. نمونه‌ای از این روش را می‌توان در مطالعات جعفری و داودی در سال ۱۳۸۰ مشاهده کرد. در این مطالعات، به دلیل نیاز به ثبت ارتعاشات حاصل از انفجار در مغار نیروگاه سد مسجدسلیمان، که ثبت دامنهٔ مطلق ارتعاشات با محتوای فرکانسی بالا مورد درخواست کارفرما بود و به دلیل شفاف نبودن اطلاعات موجود در مشخصات فنی حسگرها و ثبّاتها در مورد حداکثر قابلیت ثبت محتوای فرکانسی دستگاهها (با توجه به محدودیت فرکانسی حسگر و نوع فیلتر استفاده شده در آن)، استفاده از دستگاه میز لرزان مستقر در پژوهشگاه در دستور کار قرار گرفت. بدین منظور، ۹ دستگاه حسگر ۱-*SS* و ۹ دستگاه حسگر ۱۱-*FBA* به همراه چهار دستگاه ثبّات ۱-*SSR* سه کاناله و یک دستگاه ثبّات ۱-*SSR* شش کاناله، یک دستگاه حسگر و ثبّات ۲-*SSA*، دو دستگاه ژئوفون ژئوسایزمیک با فواصل مشخص و در جهت ارتعاش میز لرزان بر روی میز نصب گردید. به منظور کنترل مضاعف ارتعاش میز لرزان نیز از دو حسگر تغییرمکان‌سنج دینامیکی آزمایشگاه دینامیک خاک استفاده گردید. نتایج به دست آمده، علاوه بر مشخص نمودن محدوده کاربرد دستگاهها (که برای سرعت‌سنجها، $16/6 mm/s$ و برای شتاب‌سنجها $1g$ به دست آمد)، از حداکثر اختلاف در دامنه و محتوای فرکانسی برای نگاشتهای ثبت شده با ۱-*SS* برابر ۵ درصد و برای نگاشتهای ثبت شده با ۱۱-*FBA* برابر ۱۵ درصد بود. در مرحله دوم آزمایش نیز با استفاده از سه حسگر لرزه‌نگار، سه حسگر شتاب‌سنج، دو دستگاه ثبّات و دو حسگر تغییرمکان‌سنج به منظور تعیین قابلیت حسگرها برای ثبت ارتعاشات با محتوای

3 . Step Response

فرکانسی بالاتر از ۵۰ هرتز و امکان استفاده از فیلترهای با فرکانس حدی بالا انجام شد و نشان داد با وجود دارا بودن قابلیت ثبّاتها به منظور استفاده از چنین فیلترهایی، به دلیل محدودیت موجود در حسگرها، نمی‌توان ارتعاشات بالاتر از فرکانس ۵۰ هرتز را به درستی ثبت کرد [۱۱ و ۱۲].

در حال حاضر، به منظور ارزیابی مقطع سرعت موج برشی در لایه‌های زیرسطحی، استفاده از روش ثبت آرایه‌ای خردلرزه‌ها به‌عنوان یکی از طرحهای مصوب پژوهشی در برنامه مطالعاتی پژوهشگاه قرار گرفته است. بر همین اساس، لزوم کالیبره کردن ۱۵ دستگاه *CMG-6TD* به منظور استفاده همزمان در چیدمان آرایه‌ای مدّ نظر قرار گرفت و دستگاههای مذکور در سال ۱۳۸۵ با استفاده از دومین و چهارمین روش کالیبره کردن آزمایش شد [۱۳]. لزوم استفاده از روش چهارم در تعداد محدودتری از دستگاهها در کنار روش دوم، به دلیل نیاز به ثبت دامنهٔ مطلق ارتعاشات در دیگر پروژه‌های مرتبط با دستگاههای مذکور احساس نیاز شد که با وجود پی‌گیریهای به‌عمل آمده از شرکت سازنده، برخی ابهامات موجود در مشخصات فنی دستگاهها در مورد حداکثر دامنه قابل ثبت در فرکانس‌های مختلف ارتعاش برطرف گردید. در ادامه به آزمایشها و نتایج به دست آمده اشاره شده است.

۴- مشخصات عمومی دستگاههای مورد استفاده در آزمایش

به مشخصات عمومی دستگاههای مورد استفاده در آزمایش در بخشهای بعد اشاره شده است.

۴-۱- مشخصات عمومی دستگاههای CMG-6TD

دستگاه *CMG-6TD* با قابلیت تنظیم فرکانس طبیعی، ساختمان محکم، با دوام و ضد آب با ابعاد ۱۵۴ میلیمتر قطر، ۲۴۲ میلیمتر ارتفاع و ۵ کیلوگرم وزن، ساخت کارخانهٔ گورالپ انگلیس است و به طور وسیعی به عنوان سرعت‌سنج در کارهای صحرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمایی از این دستگاه لرزه‌نگار به همراه *GPS* متصل به آن در تصویر (۱) آورده شده است. این دستگاه قادر به ۱۰۰ نمونه‌برداری در ثانیه است. هر حسگر در محدوده فرکانسی ۵۰-۰/۰۱ هرتز به ارتعاشات زمین حساس است. هنگام ضبط نگاشتها، اطلاعات، نخست بر روی دیسک سخت این دستگاه با ظرفیت ۲*Gb* ضبط و سپس به کامپیوتر منتقل می‌گردد.

برای هر دستگاه، توسط کارخانه سازنده، جداولی برای تبدیل خروجی و محاسبه مجدد ضریب خروجی دیجیتال ارائه شده است که یک نمونه از آن برای دستگاه با شماره سریال ۶۱۷۴ در جدول (۱) آورده شده است [۱۴].

تصویر (۱): نمایی از یک دستگاه CMG-6TD به همراه متعلقات آن [۱۴]

جدول (۱): ضرایب دستگاهی یک حسگر CMG-6TD با شماره سریال ۶۱۷۴ [۱۴]

مولفهٔ حسگر	خروجی دیجیتال موقعیت جرم (10^{-6}m/s^2/count)	خروجی دیجیتال موقعیت جرم (uV/count)	پاسخ موقعیت جرم (V/m/s^2)	ثابت سیم‌پیچ (A/m/s^2)	خروجی دیجیتال (10^{-10}m/s/count)	خروجی دیجیتایزر (uV/count)	پاسخ سرعت (V/m/s)
قائم	۹/۴۴۵	۰/۵۸۲۱	۱۶/۲۳	۰/۰۰۲۷	۲/۵۰۵	۰/۲۷۱۰	۱۰۸۱/۷۹
شمالی- جنوبی	۹/۳۷۳	۰/۵۸۳۰	۱۶/۰۸	۰/۰۰۲۷	۲/۴۵۶	۰/۲۶۳۲	۱۰۷۱/۷۸
شرقی- غربی	۹/۷۱۷	۰/۸۵۴۵	۱۶/۶۳	۰/۰۰۲۸	۲/۳۹۷	۰/۲۶۵۶۷	۱۱۰۸/۴۰

۴-۲- مشخصات کلی دستگاه میز لرزان

دستگاه میز لرزان هیدرولیکی دو محوره[۴] مستقر در پژوهشگاه، ساخت کارخانه سروتست[۵] است. دستگاه مذکور دارای قابلیت اعمال حداکثر فرکانس بارگذاری ۵۰۰HZ، حداکثر شتاب g ۸۲، حداکثر سرعت m/s ۰/۶۴ و حداکثر تغییر مکان پیک تا پیک ۵۰ میلیمتر و قادر است در یک جهت افقی یا قائم بر مدل ساخته شده بر روی میز، ارتعاش وارد سازد [۱۵].

۴-۳- حسگرهای شتاب‌سنج

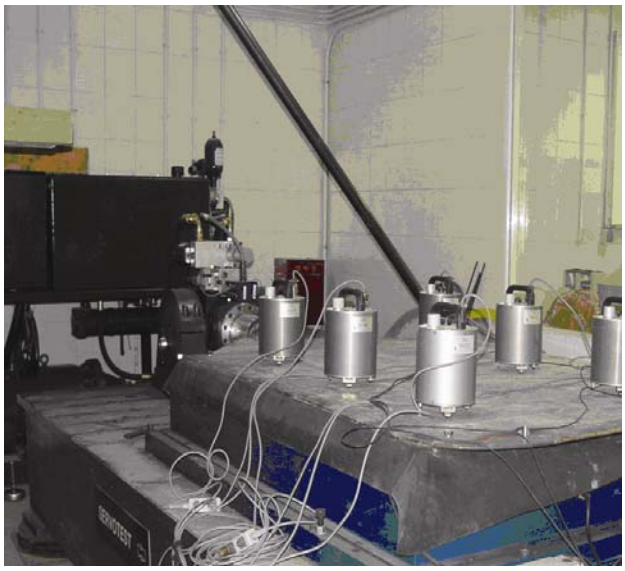
حسگرهای شتاب سنج که در دو نوع تک مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای بر روی دستگاه میز لرزان نصب گردید عموماً در مدل‌های سازه‌ای به کار می‌رود. این حسگرها که پارامتر شتاب را اندازه‌گیری می‌نماید و دقتی در حدود $0/01g$ دارد، نسبت به ارتعاشات بسیار ضعیف در دامنه و فرکانس‌های پایین، حساسیت مناسبی ندارد.

۵- نحوهٔ انجام آزمایش کالیبره نمودن

آزمایش کالیبره نمودن حسگرهای *CMG-6TD* به کمک میز لرزان پژوهشگاه در تاریخ دوازدهم و سیزدهم آذرماه ۱۳۸۵ انجام شد. ابتدا، زمان داخلی دستگاهها با استفاده از *GPS* در فضای آزاد همزمان و سپس با انتقال آنها به آزمایشگاه، بر روی صفحهٔ فولادی مستقر بر میز لرزان مطابق تصویر (۲) نصب گردید. در این آزمایش، حسگرهای سرعت‌سنج در محدوده فرکانسی ۰/۲ تا ۳۰ هرتز و در محدوده پله‌های تغییرمکانی ۰/۰۰۵ تا ۱ میلیمتر به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حسگرها و مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی نگاشتهای ثبت شده با آنها مرتعش گردیدند.

برای ثبت پاسخ میز لرزان به فرکانس و تغییرمکان اعمال شده نیز از پنج حسگر بیرونی شتاب سنج استفاده شد. تعداد نمونه‌برداری برای حسگرهای سرعت‌سنج ۱۰۰ و برای شتابنگارها، برابر ۱۵۰ نمونه در ثانیه انتخاب گردید. مدت زمان ضبط نگاشت برای هر پلهٔ بارگذاری با توجه به تعداد حداقل نقاط مورد نیاز برای پردازش، تعداد زیاد پله‌های بارگذاری و مهارت اپراتور دستگاه میز لرزان، در حدود ۱۵ تا ۲۰ ثانیه انتخاب گردید.

4.Bi-Axial Servohydraulic Vibration Test System
5. Servotest



تصویر(۲): نحوه استقرار حسگرهای CMG-6TD و شتاب‌سنجها بر روی میز لرزان

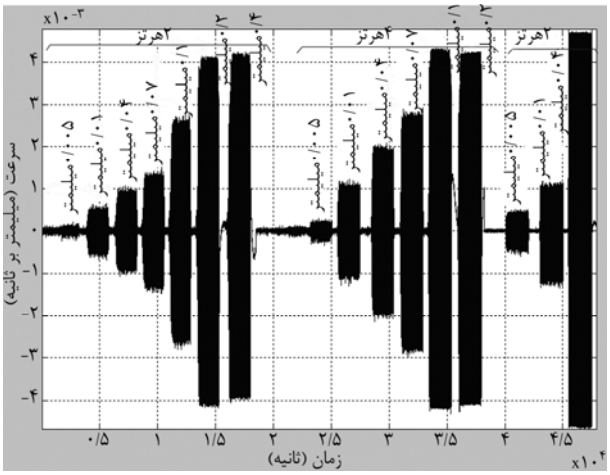
هنگام آزمایش با دستگاه میز لرزان، با مشاهده ارتعاش در یک دستگاه *Laptap* متصل به یک حسگر و برای محدود کردن ارتعاشات به حداکثر مقدار قابل ثبت[۶] در یک فرکانس مشخص، از افزایش تغییرمکان بارگذاری میز لرزان پرهیز می‌شد.

۶- تحلیل نگاشتهای آزمایش

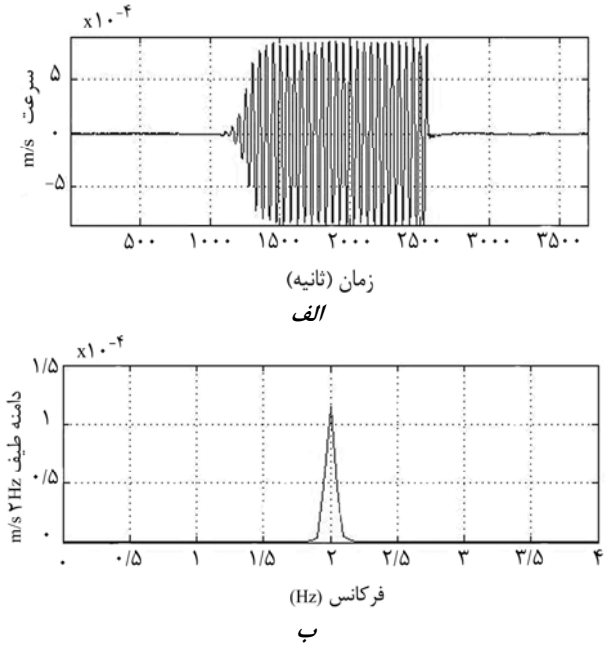
به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حسگرها و مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات ثبت شده با آنها، عملیات پردازش نگاشتهای ثبت شده توسط حسگرهای مستقر بر میز لرزان، پس از انتقال از دستگاه به رایانه، با استفاده از نرم‌افزارهای *Matlab*۰/۷ و *Seismosignal* انجام شد و تاریخچهٔ زمانی نگاشت، محتوای فرکانسی و نیز تاریخچهٔ زمانی تغییر مکان با استفاده از روش انتگرال‌گیری به دست آمد.

تاریخچه زمانی سرعت ثبت شده با یک حسگر بر حسب میلیمتر بر ثانیه به ترتیب در سه فرکانس بارگذاری ۲، ۴ و۲۰ هرتز در شکل (۱) نشان داده شده است. در هر فرکانس بارگذاری دامنه‌های تغییرمکان میز لرزان از مقادیر کوچک تا مقادیر نسبتاً بزرگ تغییر می‌یابد. همچنین تاریخچه زمانی و محتوای فرکانسی برای نگاشت ثبت شده توسط حسگر ۶۲۵۲ در فرکانس ۲ هرتز و تغییرمکان ۰/۰۷ میلیمتر در شکل (۲) آورده شده است.

6. Clipping Level



شکل (۱): تاریخچه زمانی سرعت ثبت شده با حسگر ۶۲۵۲ بر حسب میلیمتر بر ثانیه به ترتیب در سه فرکانس بارگذاری ۲، ۴ و ۲۰ هرتز در تغییرمکانهای مندرج در هر پله بارگذاری



شکل (۲): تاریخچه زمانی (الف) و محتوای فرکانسی (ب) نگاشت ثبت شده توسط حسگر ۶۲۵۲ در فرکانس ۲ هرتز و دامنه تغییرمکان ۰/۰۷ میلیمتر

نمونه‌ای از نتایج تحلیل مقایسه نسبی دامنه و محتوای فرکانسی در فرکانس ۲ هرتز و در تغییر مکان ۰/۱ میلیمتر در جدول (۲) آورده شده است. بر اساس نتایج تحلیل ارائه شده در جدول مذکور، حداکثر اختلاف دامنه ارتعاش سرعت در فرکانس ۲ هرتز در دستگاههای *CMG-6TD* به ۳ درصد و در سایر فرکانس‌ها به ۱۱ درصد محدود می‌شود. نتایج سایر پله‌های بارگذاری نیز مؤید این مطلب است که دامنه ارتعاش ثبت شده با حسگرهای شتاب‌سنج، اختلاف قابل توجهی با دستگاههای لرزه‌نگار دارد؛ به طوری که حداکثر اختلاف دامنه سرعت به ۵/۴ درصد در فرکانس ۲ هرتز و تا ۱۵ درصد در سایر فرکانس‌ها و حداکثر اختلاف در فرکانس به میزان ۱/۷۷ درصد در فرکانس ۲ هرتز و تا ۲ درصد در سایر فرکانس‌ها و حداکثر اختلاف تغییر مکان به ۶ درصد در فرکانس ۲ هرتز و تا ۲۰ درصد در سایر فرکانس‌ها می‌رسد. لازم به ذکر است که خطای محاسبه شدهٔ بین حسگرها در حالات مختلف ارتعاش میز لرزان مقدار ثابتی نیست و به فرکانس و دامنهٔ تغییرمکان ارتعاش میز لرزان بستگی دارد.

هدف اولیه از آزمایش کالیبره کردن، علاوه بر محاسبه مقادیر اختلاف در دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات ثبت شده در حسگرهای مختلف، برآورد حداکثر و حداقل دامنه ارتعاشات قابل ثبت در فرکانس‌های مختلف بارگذاری و مقایسه با مقادیر نظری بوده است. در این راستا، نتایج پردازش نشان داد که تأثیر نوفه در فرکانس‌های پایین بارگذاری، شتاب سینوسی اعمال شده از طرف میز لرزان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شتابنگارها نیز نوفه‌های ضعیف دیگری را ثبت می‌کنند که با افزایش فرکانس و دامنهٔ بارگذاری، شتاب میز حالت منظم سینوسی پیدا می‌کند. علاوه بر آن، حسگر سرعت-سنج در فرکانس۲۰ هرتز حداکثر تا پله تغییرمکان ۰/۰۱ میلیمتر میز لرزان را می‌تواند ثبت کند و بیش از آن، دامنهٔ ارتعاش، بریده خواهد شد که مقدار حد سرعت از شکل (۱) برابر ۳/۸ ± میلیمتر بر ثانیه به دست می‌آید. این امر در سایر پله‌های بارگذاری نیز به همین منوال مشاهده گردید. بر مبنای مطالعات تکمیلی که در فرکانس‌ها و دامنه‌های بارگذاری مختلف دستگاه میز لرزان انجام شد حداکثر محدوده قابل ثبت توسط دستگاههای لرزه‌نگار *CMG-6TD* مطابق جدول (۳) به دست آمد، که می‌تواند در استفاده از این حسگرها به کار رود.

از جمله نکات قابل توجه این آزمایش ثبت ارتعاشاتی با فرکانس مشابه در دو مؤلفه دیگر حسگرها بود. مشاهده چنین ارتعاشی در کلیه حسگرها نشان می‌دهد که دستگاه میز لرزان علاوه بر ایجاد ارتعاش در جهت طولی (که مورد نظر آزمایش است)، ارتعاشات دیگری نیز در دو راستای عرضی و قائم اعمال می‌کند که مقدار آن با قرار دادن حسگرهایی در جهات مذکور قابل اندازه‌گیری است. نمونه‌ای از این ارتعاش در مقیاس مساوی در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول (۲): مقایسه نسبی دامنه سرعت، تغییرمکان و محتوای فرکانسی دستگاههای مختلف با دستگاه ۶۱۸۰ در فرکانس ۲ هرتز و تغییرمکان ۰/۱ میلیمتر با اعمال فیلتر میان‌گذر در محدوده فرکانسی ۲۵-۰/۱ هرتز

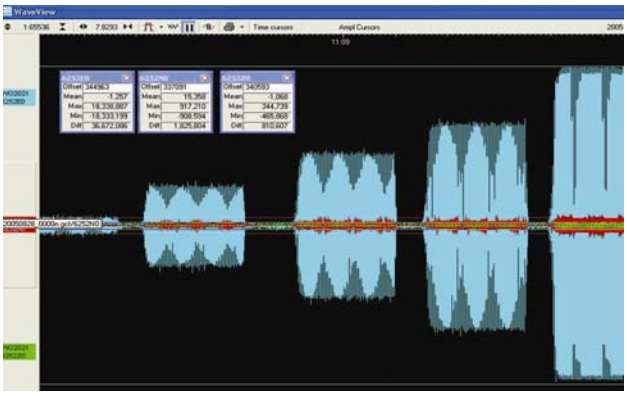
نام دستگاه	دامنه سرعت		دامنه طیف توان سرعت		دامنه تغییر مکان		فرکانس	
	حداکثر مقدار سرعت(mm/s)	درصد اختلاف(%)	مقدار دامنه $((m/s)^2/HZ)$	درصد اختلاف (%)	حداکثر تغییرمکان (میکرون)	درصد اختلاف (%)	مقدارمحاسباتی (Hz)	درصد اختلاف (%)
لرزه‌نگار ۶۱۸۰	۱/۲۶۵	۰/۰	۲/۰۶۸۳	۰/۰۰	۱۰۵/۶۴	۰	۲/۰۱۴	۰
لرزه‌نگار ۶۲۱۰	۱/۲۵۴	-۰/۸	۲/۰۶۸۰	-۰/۰۱	۱۰۴/۱۲	-۱	۲/۰۱۴	۰
لرزه‌نگار ۶۲۱۵	۱/۲۸۴	۱/۵	۲/۰۶۸۴	۰/۰۱	۹۵/۵۶	-۱	۲/۰۱۴	۰
لرزه‌نگار ۶۲۱۸	۱/۲۴۳	-۱/۷	۲/۰۶۷۵	-۰/۰۴	۱۰۲/۳۰	-۳	۲/۰۱۴	۰
لرزه‌نگار ۶۲۱۹	۱/۲۶۷	۰/۱	۲/۰۶۷۸	-۰/۰۲	۱۰۴/۵۶	-۱	۲/۰۱۴	۰
لرزه‌نگار ۶۲۵۲	۱/۲۴۸	-۱/۳	۲/۰۶۷۹	-۰/۰۲	۱۰۴/۳۱	-۱	۲/۰۱۴	۰
لرزه‌نگار ۱	۱/۲۶۷	۰/۹	۱/۸۸۵۳	-۸/۸۵	۱۰۹/۱۳	۳	۲/۰۴۹	۱/۷۷
لرزه‌نگار ۲	۱/۲۶۰	-۰/۴	۱/۸۸۶۲	-۸/۸۰	۹۹/۴۴	-۶	۲/۰۴۹	۱/۷۷
لرزه‌نگار ۳	۱/۳۳۳	۵/۴	۱/۸۸۵۴	-۸/۸۴	۱۰۹/۹۹	۴	۲/۰۴۹	۱/۷۷

جدول (۳): محدوده کارکرد دستگاههای CMG-6TD در فرکانس‌ها و تغییرمکانهای متفاوت

	فرکانس (Hz)													
تغییر مکان میلیمتر	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۵	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۵	۲۰	۳۰
۰/۰۰۵														
۰/۰۱														
۰/۰۴														
۰/۰۷														
۰/۱														
۰/۲														
۰/۴														
۰/۶														
۰/۸														
۱														
۵														

محدوده کاربرد حسگرهای CMG-6TD

محدوده ارتعاشات اعمال شده توسط میز لرزان



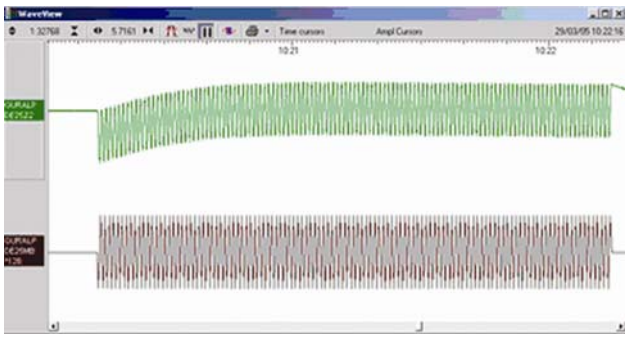
شکل (۳): مقایسه دامنه ارتعاشات ثبت شده در هر سه مؤلفه یک دستگاه حسگر CMG-6TD در حالت تحریک طولی دستگاه میز لرزان. دامنه قوی‌تر مربوط به جهت طولی است و ارتعاشات در دو جهت دیگر، دامنه ضعیفتری دارد.

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته در اغلب پله‌های بارگذاری، این میزان ارتعاش در حدود ۱۰ درصد ارتعاش مؤلفه اصلی مشاهده شد؛ لذا ضروری است در صورت اهمیت داشتن تأثیر این میزان ارتعاش در مدل‌های مورد بررسی در میز لرزان، ارتعاش در هر سه مؤلفه بدقت ثبت گردد و در محاسبات مدل مدّ نظر قرار گیرد.

۷-کالیبره کردن دستگاهها با استفاده از نرم‌افزار SCREAM

کالیبره کردن حسگرهای *CMG-6TD* با استفاده از اعمال امواج مشخص و بررسی خروجی دستگاه با استفاده از

نرم‌افزار *SCREAM* و یک دستگاه کامپیوتر می‌تواند صورت گیرد. البته این عمل با استفاده از یک دستگاه کنترل دستی[7] و یا نوسان‌سنج نیز امکانپذیر است. بسته به نوع مبدل آنالوگ به دیجیتال، سیگنال ممکن است به صورت امواج سینوسی، پله واحد و یا نوفه‌های باند پهن ایجاد گردند. در نرم‌افزار مذکور می‌توان نوع سیگنال، میزان دامنه، مقدار فرکانس، مدت زمان و مؤلفه اعمالی سیگنال ورودی را مشخص کرد. پس از اعمال سیگنال مورد نظر به دستگاه، پاسخ دستگاه و سیگنال ورودی را می‌توان به صورت *On line* مشاهده کرد (شکل ۴). علاوه بر آن، اگر لازم باشد می‌توان سیگنال را با مقیاس واحد و یا هر مقیاس مناسب دیگری مشاهده کرد. در ادامه، با استفاده از ضرایب *μV/Bit* که در جداول کالیبره کردن برای هر حسگر آورده شده است (مشابه جدول ۱)، سیگنال ورودی به ولت تبدیل می‌شود.



شکل(۴): ورودی اعمالی بر حسگر (تصویر بالا) و خروجی (تصویر پایین) ایجاد شده در نرم‌افزار SCREAM [۱۴]

یک مقاومت الکتریکی در چرخه کالیبره کردن نصب شده است که مقدار آن در جداول کالیبره کردن معرفی شده است. ولتاژ ورودی که در مرحله آخر اندازه‌گیری می‌شود، ولتاژ مؤثر عبوری از این مقاومت است، که برای محاسبه جریان عبوری از سیم‌پیچ کالیبره کردن مطابق رابطه (۱) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$I = V / R \qquad (۱)$$

در این رابطه، V ولتاژ ورودی (معادل سرعت ورودی) و R مقاومت سیم‌پیچ کالیبره‌کردن است. با تقسیم جریان عبوری *(I)* به ضریب ثابت سیم‌پیچ *(K)*، شتاب کالیبره کردن مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$a = I / K = V (RK) \qquad (۲)$$

مقادیر ضرایب R و K در جداول کالیبره کردن مربوط به هر دستگاه مطابق جدول (۱) آورده شده است. همچنین با تقسیم شتاب بر فرکانس زاویه‌ای، مقدار سرعت *(V)* مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$v = a /(۲\pi f) = V/(۲\pi f RK) \qquad (۳)$$

با تقسیم سرعت ورودی معادل محاسبه شده در رابطه (۳) بر مقدار کانت خروجی، ضریب خروجی دیجیتال به دست می‌آید [۱۵].

با توجه به روند کالیبره کردن ذکر شده در مطالب مذکور، ۱۵ دستگاه لرزه‌نگار از مجموعه دستگاههای موجود *CMG-6TD* انتخاب شد و پس از انجام آزمایش کالیبره کردن با نرم‌افزار مورد نظر بر روی آنها، نتایج حاصل جمع‌آوری گردید (جدول ۴). در این جدول به منظور مقایسه نتایج حاصل از آزمایش مذکور با مقادیر قبلی، میزان اختلاف، محاسبه و در ستون آخر ارائه شده است. بررسی این مقادیر نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل اختلاف خروجی دیجیتال دستگاهها با مقادیر قبلی، به ترتیب به ۵/۹ و ۰/۳ درصد محدود می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

آزمایش کالیبره نمودن حسگرهای سرعت‌سنج *CMG-6TD* با دو روش استفاده از دستگاه میز لرزان پژوهشگاه و استفاده از نرم‌افزار *SCREAM* به منظور تعیین محدودهٔ کاربرد حسگرها از نظر دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات ورودی و برای مقایسهٔ نسبی دامنه و محتوای فرکانسی ارتعاشات ثبت شده با آنها و محاسبه خروجی دیجیتال دستگاهها انجام شد. نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱. برای کلیهٔ حسگرها، حداکثر اختلاف بین دامنه، بسته به فرکانس و تغییر مکان مورد بررسی متفاوت است. برای مثال، حداکثر اختلاف دامنه ارتعاش سرعت در فرکانس ۲ هرتز در دستگاههای *CMG-6TD* به ۳ درصد و در سایر فرکانس‌ها به ۱۱درصد محدود می‌شود. همچنین در مقدار فرکانس نگاشتهای ثبت شده با دستگاههای لرزه‌نگار هیچ اختلافی مشاهده نمی‌شود.

۲. در این آزمایش، محدودهٔ کاربرد حسگرها در فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف ارتعاش میز لرزان در فرکانس‌های پایین‌تر از ۳۰ هرتز به دست آمد. بر این اساس، حداکثر

7 . Handheld Control Unit

جدول (۴): نتایج کالیبراسیون ۱۵ دستگاه CMG-6TD با استفاده از نرم‌افزار SCREAM

ردیف	شماره دستگاه	مؤلفه	خروجی (کانت)	ورودی (کانت)	خروجی دیجیتایزر (uV/count)	ورودی (ولت)	جریان ($۱۰^{-۵}$ آمپر)	ثابت سیم‌پیچ (A/m/s2)	شتاب ($۱۰^{-۲}$m/s^2)	سرعت ($۱۰^{-۲}$m/s)	خروجی دیجیتال جدید ($۱۰^{-۱۰}$m/s/count)	خروجی دیجیتال قدیم ($۱۰^{-۱۰}$m/s/count)	درصد اختلاف
۱	۶۱۷۴	V	۹۳۴۷۵۱۳	۱۱۴۰۴۶۸۳	۰/۲۷۱	۳/۰۹۰۶۷	۶/۰۶	۰/۰۰۲۷	۲/۲۴	۱/۱۹	۲/۵۵	۲/۵۱	۱/۸
		N-S	۹۲۸۰۱۶۵	۱۱۴۰۴۶۸۳	۰/۲۶۳۲	۳/۰۰۱۷۱	۵/۸۹	۰/۰۰۲۷	۲/۱۸	۱/۱۶	۲/۴۹	۲/۴۶	۱/۵
		E-W	۹۶۷۵۲۱۴	۱۱۴۰۴۶۸۳	۰/۲۶۵۷	۳/۰۳۰۲۲	۵/۹۴	۰/۰۰۲۸	۲/۱۲	۱/۱۳	۲/۳۳	۲/۴۰	-۲/۹
۲	۶۱۸۰	V	۹۷۵۲۳۴۵	۱۱۵۴۳۲۸۸	۰/۲۷۳۲	۳/۱۵۳۶۳	۶/۱۸	۰/۰۰۲۷	۲/۲۹	۱/۲۲	۲/۴۹	۲/۵۰	-۰/۳
		N-S	۹۴۲۷۵۸۳	۱۱۵۴۳۲۸۸	۰/۲۵۵۳	۲/۹۴۷	۵/۷۸	۰/۰۰۲۷	۲/۱۴	۱/۱۴	۲/۴۱	۲/۳۹	۰/۹
		E-W	۹۵۴۷۶۳۰	۱۱۵۴۳۲۸۸	۰/۲۵۹۷	۲/۹۹۷۷۹	۵/۸۸	۰/۰۰۳	۱/۹۶	۱/۰۴	۲/۱۸	۲/۱۳	۲/۲
۳	۶۲۱۰	V	۹۲۵۴۸۶۳	۱۱۶۶۵۸۷۳	۰/۲۸۱	۳/۲۷۸۱۱	۶/۴۳	۰/۰۰۲۹	۲/۲۲	۱/۱۸	۲/۵۴	۲/۴۴	۴/۳
		N-S	۹۳۴۲۸۶۷	۱۱۶۶۵۸۷۳	۰/۲۶۵۵	۳/۰۹۷۲۹	۶/۰۷	۰/۰۰۲۷	۲/۲۵	۱/۱۹	۲/۵۶	۲/۴۸	۲/۹
		E-W	۹۴۵۷۲۳۴	۱۱۶۶۵۸۷۳	۰/۲۵۸۷	۳/۰۱۷۹۶	۵/۹۲	۰/۰۰۲۷	۲/۱۹	۱/۱۶	۲/۴۶	۲/۳۸	۳/۵
۴	۶۲۱۸	V	۹۷۴۱۳۴۵	۱۱۱۲۴۸۶۹	۰/۲۶۷۳	۲/۹۷۳۶۸	۵/۸۳	۰/۰۰۲۷	۲/۱۶	۱/۱۵	۲/۳۵	۲/۵۰	-۵/۹
		N-S	۹۶۵۱۴۷۵	۱۱۱۲۴۸۶۹	۰/۲۶۲۱	۲/۹۱۵۸۳	۵/۷۲	۰/۰۰۲۹	۱/۹۷	۱/۰۵	۲/۱۷	۲/۲۶	-۴/۰
		E-W	۹۸۷۵۳۲۴	۱۱۱۲۴۸۶۹	۰/۲۵۶۳	۲/۸۵۱۳	۵/۵۹	۰/۰۰۲۶	۲/۱۵	۱/۱۴	۲/۳۱	۲/۴۳	-۵/۰
۵	۶۲۲۶	V	۹۳۴۷۶۴۲	۱۱۶۰۴۰۷۶	۰/۲۷۰۲	۳/۱۳۵۴۲	۶/۱۵	۰/۰۰۲۷	۲/۲۸	۱/۲۱	۲/۵۹	۲/۴۶	۵/۰
		N-S	۹۷۲۴۵۱۰	۱۱۶۰۴۰۷۶	۰/۱۶۷۷	۱/۹۴۶	۳/۸۲	۰/۰۰۲۹	۱/۳۲	۶/۹۸	۱/۴۴	۱/۴۶	-۱/۶
		E-W	۹۲۷۶۵۵۶	۱۱۶۰۴۰۷۶	۰/۲۶۴۲	۳/۰۶۵۸	۶/۰۱	۰/۰۰۲۹	۲/۰۷	۱/۱۰	۲/۳۷	۲/۲۷	۴/۶
۶	۶۲۶۷	V	۹۲۴۵۷۶۱	۱۱۵۰۲۳۴۰	۰/۲۸۵۲	۳/۲۳۵۶۱	۶/۳۴	۰/۰۰۳	۲/۱۱	۱/۱۲	۲/۴۳	۲/۳۴	۳/۶
		N-S	۹۵۷۴۲۵۷	۱۱۵۰۲۳۴۰	۰/۲۶۵۶	۳/۰۳۴۳۲	۵/۹۵	۰/۰۰۲۹	۲/۰۵	۱/۰۹	۲/۲۷	۲/۳۱	-۱/۶
		E-W	۹۴۵۷۶۲۱	۱۱۵۰۲۳۴۰	۰/۲۶۱۶	۳/۰۲۷۴۲	۵/۹۵	۰/۰۰۲۷	۲/۲۰	۱/۱۷	۲/۴۷	۲/۳۹	۳/۱
۷	۶۲۵۰	V	۹۳۴۳۷۸۵	۱۱۰۱۵۳۱۴	۰/۲۷۲۷	۳/۰۰۳۸۸	۵/۸۹	۰/۰۰۳	۱/۹۶	۱/۰۴	۲/۲۳	۲/۳۰	-۳/۰
		N-S	۹۴۴۲۷۵۴	۱۱۰۱۵۳۱۴	۰/۲۶۸۹	۳/۹۶۲۰۲	۵/۸۱	۰/۰۰۲۸	۲/۰۷	۱/۱۰	۲/۳۳	۲/۴۱	-۳/۴
		E-W	۹۵۴۵۷۳۴	۱۱۰۱۵۳۱۴	۰/۲۶۹۷	۲/۹۷۰۸۳	۵/۸۳	۰/۰۰۲۹	۲/۰۱	۱/۰۷	۲/۲۳	۲/۳۴	-۴/۶
۸	۶۲۵۳	V	۹۴۵۴۳۱۲	۱۱۴۵۴۱۷۵	۰/۲۸۳	۳/۲۴۱۵۳	۶/۳۶	۰/۰۰۲۸	۲/۲۷	۱/۲۰	۲/۵۵	۲/۵۰	۲/۰
		N-S	۹۳۴۵۷۲۴	۱۱۴۵۴۱۷۵	۰/۲۷۶۵	۳/۱۶۷۰۸	۶/۲۱	۰/۰۰۲۹	۲/۱۴	۱/۱۴	۲/۴۳	۲/۳۸	۲/۲
		E-W	۹۵۷۴۲۳۴	۱۱۴۵۴۱۷۵	۲۶۵۱۸	۳/۰۳۷۴۲	۵/۹۶	۰/۰۰۳	۱/۹۹	۱/۰۵	۲/۲۰	۲/۲۴	-۱/۷
۹	۶۲۵۵	V	۹۳۴۵۲۷۴	۱۱۴۹۹۹۹۲	۰/۲۶۷۶	۳/۱۲۸	۶/۱۳	۰/۰۰۲۷	۲/۲۷	۱/۲۱	۲/۵۸	۲/۴۹	۳/۶
		N-S	۹۴۵۷۱۲۴	۱۱۴۹۹۹۹۲	۰/۲۷۶۶	۳/۰۹۹۲۵	۶/۰۸	۰/۰۰۲۸	۲/۱۷	۱/۱۵	۲/۴۴	۲/۳۹	۲/۱
		E-W	۹۳۴۵۷۳۴	۱۱۴۹۹۹۹۲	۰/۲۴۲۱	۳/۱۱۷۶۵	۶/۱۱	۰/۰۰۲۹	۲/۱۱	۱/۱۲	۲/۳۹	۲/۳۰	۴/۱
۱۰	۶۲۵۸	V	۹۴۲۷۵۴۵	۱۱۶۱۰۲۰۲	۰/۲۸۷۳	۳/۳۳۵۶۱	۶/۵۴	۰/۰۰۲۷	۲/۴۲	۱/۲۹	۲/۷۳	۲/۷۰	۰/۹
		N-S	۹۳۴۲۷۵۵	۱۱۶۱۰۲۰۲	۰/۲۵۷۳	۲/۹۸۷۳	۵/۸۶	۰/۰۰۲۸	۲/۰۹	۱/۱۱	۲/۳۸	۲/۳۱	۲/۸
		E-W	۹۶۴۲۷۵۵	۱۱۶۱۰۲۰۲	۰/۲۶۸۳	۳/۱۱۵۰۲	۶/۱۱	۰/۰۰۲۷	۲/۲۶	۱/۲۰	۲/۴۹	۲/۴۶	۱/۱
۱۱	۶۲۵۹	V	۹۴۲۷۵۳۵	۱۱۴۰۶۳۴۶	۰/۲۶۸	۳/۰۵۶۹	۵/۹۹	۰/۰۰۲۶	۲/۳۱	۱/۲۲	۲/۶۰	۲/۵۷	۰/۹
		N-S	۹۳۴۲۷۵۴	۱۱۴۰۶۳۴۶	۰/۲۶۴۵	۳/۰۱۶۹۸	۵/۹۲	۰/۰۰۲۸	۲/۱۱	۱/۱۲	۲/۴۰	۲/۳۶	۱/۸
		E-W	۹۵۷۸۶۴۲	۱۱۴۰۶۳۴۶	۰/۲۵۵۴	۲/۹۱۳۱۸	۵/۷۱	۰/۰۰۲۶	۲/۲۰	۱/۱۷	۲/۴۳	۲/۵۰	-۲/۵
۱۲	۶۲۶۱	V	۹۴۲۷۵۴۵	۱۱۶۶۸۲۴۲	۰/۲۶۸۵	۳/۲۴۳۷۷	۶/۳۶	۰/۰۰۲۶	۲/۴۵	۱/۳۰	۲/۷۵	۲/۶۴	۴/۴
		N-S	۹۵۵۴۲۳۴	۱۱۶۶۸۲۴۲	۰/۲۶۱۴	۳/۱۲۰۰۹	۶/۱۲	۰/۰۰۲۷	۲/۲۷	۱/۲۰	۲/۵۲	۲/۴۸	۱/۷
		E-W	۹۶۷۲۴۳۷	۱۱۶۶۸۲۴۲	۰/۲۶۱۶	۳/۳۴۰۶۲	۶/۵۵	۰/۰۰۲۸	۲/۳۴	۱/۲۴	۲/۵۷	۲/۵۳	۱/۴
۱۳	۶۲۵۲	V	۹۱۴۳۲۵۰	۱۱۲۹۰۰۷۹	۰/۲۶۷۴	۲/۹۵۳۴۸	۵/۷۹	۰/۰۰۲۵	۲/۳۲	۱/۲۳	۲/۶۹	۲/۶۲	۲/۷
		N-S	۹۳۴۲۷۵۴	۱۱۲۹۰۰۷۹	۰/۲۶۶۳	۲/۸۲۰۲۶	۵/۵۳	۰/۰۰۲۵	۲/۲۱	۱/۱۷	۲/۵۱	۲/۴۶	۲/۳
		E-W	۹۵۷۳۱۴۱	۱۱۲۹۰۰۷۹	۰/۲۷۸۹	۲/۹۲۳۷۸	۵/۷۴	۰/۰۰۲۷	۲/۱۳	۱/۱۳	۲/۳۶	۲/۴۱	-۲/۰
۱۴	۶۲۷۰	V	۹۲۴۲۴۵۷	۱۱۷۰۶۲۲۸	۰/۲۶۹۴	۳/۱۵۳۶۶	۶/۱۸	۰/۰۰۲۷	۲/۲۹	۱/۲۲	۲/۶۳	۲/۵۲	۴/۶
		N-S	۹۹۲۴۵۷۶	۱۱۷۰۶۲۲۸	۰/۲۵۴۹	۲/۹۸۳۹۲	۵/۸۵	۰/۰۰۲۷	۲/۱۷	۱/۱۵	۲/۳۲	۲/۳۶	-۱/۸
		E-W	۹۵۴۲۷۵۴	۱۱۷۰۶۲۲۸	۰/۲۵۲۴	۲/۹۵۴۶۵	۵/۷۹	۰/۰۰۲۸	۲/۰۷	۱/۱۰	۲/۳۰	۲/۲۳	۳/۴
۱۵	۶۲۸۹	V	۹۹۴۲۳۵۷	۱۱۶۰۲۰۷۸	۰/۲۷۵۲	۳/۱۹۲۸۹	۶/۲۶	۰/۰۰۲۷	۲/۳۲	۱/۲۳	۲/۴۸	۲/۵۳	-۲/۲
		N-S	۹۶۴۵۷۱۲	۱۱۶۰۲۰۷۸	۰/۲۶۵۵	۳/۰۸۰۳۵	۶/۰۴	۰/۰۰۲۸	۲/۱۶	۱/۱۴	۲/۳۷	۲/۴۰	-۱/۱
		E-W	۹۴۵۷۳۵۷	۱۱۶۰۲۰۷۸	۰/۲۸۹۶	۳/۳۵۹۹۶	۶/۵۹	۰/۰۰۳۴	۲/۹۴	۱/۰۳	۲/۱۸	۲/۱۱	۳/۲

سرعت قابل اندازه‌گیری با لرزه‌نگارهای *CMG-6TD* برابر ۳/۸ *mm/s* ± محاسبه گردید.

۳. با استفاده از نرم‌افزار *SCREAM* به راحتی می‌توان در هر سه مؤلفه، مقادیر ضرایب خروجی دیجیتال را محاسبه کرد. بر اساس مقایسه مقادیر جدید ضرایب خروجی دیجیتال با مقادیر معرفی شده از طرف کارخانه سازنده، اختلاف در دستگاههای لرزه‌نگار *CMG-6TD* از ۰/۳ تا ۵/۹ درصد تغییر می‌کند.

۴. با این آزمایش مشخص گردید در حالت کارکرد دستگاه میز لرزان در جهت طولی (که مورد نظر آزمایش است)، ارتعاشات دیگری نیز در دو راستای عرضی و قائم توسط میز بر تجهیزات مستقر بر روی آن اعمال می‌شود. براساس تحلیل‌های صورت گرفته در اغلب پله‌های بارگذاری، این میزان ارتعاش در حدود ۱۰ درصد ارتعاش مؤلفه اصلی مشاهده شد. با توجه به اینکه مقدار تحریک ناخواسته ایجاد شده در دو جهت دیگر می‌تواند بسته به وزن مدل احداث شده بر روی میز تغییر کند، ضروری است در صورت اهمیت داشتن تأثیر این میزان ارتعاش در رفتار لرزه‌ای مدل‌های مختلف مورد بررسی در میز لرزان، ارتعاش در هر سه مؤلفه بدقت ثبت گردد و در محاسبات مدل مدّ نظر قرار گیرد.

۹- سپاسگزاری

از همکاران دفتر طراحی و ساخت تجهیزات پژوهشگاه، آقایان: مهندس حمیدرضا حیدری‌مقدر، مهدی پروازه، حمیدرضا محمدیوسف و همکاران آزمایشگاه سازه پژوهشگاه، آقایان: مهندس مجید جبارزاده و سهیل حسنی و سایر عزیزانی که در مراحل مختلف انجام آزمایش صمیمانه همکاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۱۰- مراجع

1. Trifunac, M.D. (1970). *Wind and microtremor induced vibration of a twenty-two story steel frame building* [Report No. EERL 70-01]. Pasadena: California Institute of Technology.
2. Trifunac, M.D. (1970). *Ambient vibration test of a thirty- nine story steel frame* [EERL 70-02] Pasadena: Calif. Int. of Tech.
3. Abdel-Ghaffar. A.M. (1976*). Dynamic analysis of suspension bridge structures* [EERL 76-01]. Pasadena: Calif. Inst. of Tech.
4. Foutch, D.A. (1977). *A study of the vibrational characteristics of two multistory building*. Ph.D. Thesis, Calif. Inst. of Tech., Pasadena.
5. Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R.F., and Craig, M.J. (1980). *Full scale experimental investigation of a modern earth dam* [Report No. EERL 80-02]. Pasadena: California Institute of Technology.

۶. آقاکوچک، علی‌اکبر؛ معماری، علی‌محمد. (۱۳۷۲). *آزمایشات لرزه‌ای بر روی ساختمانهای واقعی* [گزارش، جلد اول و دوم]. تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۷. سیاری، آرش؛ تیو، مهران. (۱۳۷۷). *آزمایش ارتعاش اجباری روی ساختمان جدید مؤسسه و اثر دامنهٔ نیروی ورودی بر فرکانس‌های طبیعی آن*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۸. داودی، محمد. (۱۳۸۲). *ارزیابی مشخصات دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از آزمایشهای ارتعاش محیطی و اجباری*. پایان‌نامه دکتری، تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۹. یمینی فرد، فرزام. (۱۳۷۸). *کالیبراسیون دستگاههای لرزه‌نگاری SSR-۱ و SS-۱ در چاران مورخه ۷۸/۷/۷* [گزارش داخلی]. تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۱۰. غفوری آشتیانی، محسن؛ کاظم، حسین؛ تیو، مهران؛ ناطقی الهی، فریبرز. (۱۳۷۷). *آزمایش دینامیکی مدل ۱:۲ ساختمان چهار طبقه اسکلت فلزی با اتصال خرجینی* [گزارش]. تهران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۱۱. جعفری، محمدکاظم؛ داودی، محمد. (تابستان و پاییز ۱۳۸۰). آزمایش کالیبره‌کردن نسبی حسگرهای سرعت سنج *SS-1* و شتاب‌سنج *FBA*-۱۱ بر روی میز لرزان. *پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*.

12. Jafari, M.K. and Davoodi, M. (2006). Dynamic

characteristics evalution of Masjed Soleiman Dam using in-situ dynamic tests. *Canadian Geotechnical Journal, 43(10)*, 9971014.

۱۳. میرجلیلی، مصطفی. (۱۳۸۶). *کاربرد روش آرایه‌ای خردلرزه‌ها در تعیین پروفیل سرعت موج برشی لایه-های تحت‌الارضی در یک سایت نمونه در شهر تهران (پارک شقایق)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

14. *Manuals of CMG-6TD Sensor, Operator's guide, Part MAN-T60-0002.* (Issued 2005-06-02). Designed and anufactured by Güralp Systems Limited 3 Midas House, Calleva Park Aldermaston RG7 8EA England.
15. *Manuals of bi-axial servohydraulic vibration test system.* (1998). servotest Ltd., River Gardens, Feltham, Middlesex.